



Etude du comportement mécanique de sols grossiers à matrice

Bassels Seif El Dine

► To cite this version:

Bassels Seif El Dine. Etude du comportement mécanique de sols grossiers à matrice. Planète et Univers [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2007. Français. NNT : 2007ENPC0709 . pastel-00002992

HAL Id: pastel-00002992

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002992>

Submitted on 1 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	4
CHAPITRE I : ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES	6
I.1 Définition des sols grossiers – Méthodes et dispositifs d’essai.....	7
I.1.1 Définition.....	7
I.1.2 Méthodes et dispositifs d’essai	10
I.1.2.1 Essais <i>in situ</i>	10
I.1.2.2 Essais de laboratoire.....	11
I.2 Influence de paramètres de base sur les caractéristiques mécaniques des sols grossiers ...	15
I.2.1 Influence de paramètres liés aux dispositifs	16
I.2.1.1 Effet de taille des appareils de cisaillement.....	16
I.2.1.2 Influence de l’espacement entre les deux demi-boîtes de cisaillement.....	26
I.2.2 Influence des paramètres liés au sol.....	31
I.2.2.1 Influence de la proportion d’inclusion	31
I.2.2.2 Influence de la dimension des inclusions.....	35
I.2.2.3 Influence de l’étalement granulométrique des inclusions	40
I.2.2.4 Influence de la forme des inclusions.....	42
I.2.2.5 Influence de la rugosité des inclusions	46
I.2.2.6 Influence de l’état de compacité de la matrice	47
I.3 Comparaison des résultats issus de la boîte de cisaillement direct et de l’appareil triaxial	48
I.4 Méthodologie de caractérisation des sols grossiers à l’aide des appareils de taille classique au laboratoire	51
I.4.1 Méthode d’écèlement.....	52
I.4.2 Méthode de substitution	58
I.4.3 Méthode de reconstitution granulométrique par similitude	59
I.5 Conclusions	61
CHAPITRE II : PRESENTATION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET DES MATERIAUX UTILISES	64
II. 1 Dispositifs triaxiaux	64
II.1.1 Présentation de l’appareil triaxial Ø300 mm.....	64
II.1.1.1 Dispositif de chargement vertical	68
II.1.1.2 Dispositifs de mesure des déformations de l’éprouvette.....	69
II.1.2. Réalisation d’une éprouvette dans la cellule triaxiale Ø 300 mm	71
II.1.3 Présentation de l’appareil triaxial Ø100mm.....	75
II.2. Appareil de cisaillement direct	77
II.2.1 Présentation de l’appareil de cisaillement direct.....	77
II.2.2. Mode opératoire de l’essai à la boîte de cisaillement	80

II.3. Matériaux constitutifs des éprouvettes testées	80
II.3.1 Sol de référence utilisé.....	80
II.3.2 Le choix des constituants des sols grossiers de référence étudiés	82
II.4 Paramètres d'identification du sol grossier de référence	85
II.4.1 Calcul des masses.....	85
II.5 Fabrication de l'éprouvette.....	87
II.5.1 Fabrication des éprouvettes dans l'appareil triaxial Ø 300 mm	87
II.5.2 Fabrication des éprouvettes dans la grande boîte de cisaillement	88
II.6 Influence de la réutilisation des matériaux.....	89
II.7 Conclusions	91
 CHAPITRE III : CARACTERISATION DES SOLS GROSSIERS A L'AIDE DE L'APPAREIL TRIAXIAL Ø300 mm.....	 92
III.1. Programme expérimental	92
III.2. Résultats typiques et essais de répétabilité.....	95
III.2.1 Résultats typiques sur le sable de Fontainebleau	95
III.2.2 Répétabilité des essais	97
III.3 Influence des paramètres étudiés	99
III.3.1 Cas de la matrice moyennement dense ($I_D = 0,70$).....	99
III.3.1.1 Influence de la fraction volumique des inclusions f_v	99
III.3.1.2. Influence de la taille des inclusions.....	105
III.3.1.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions.....	111
III.3.1.4 Influence du niveau de consolidation.....	116
III.3.1.5 Comportement à la rupture.....	119
III.3.1.6 Notion de seuil caractéristique	122
III.3.2 Cas de la matrice lâche ($I_D = 0,30$).....	124
III.3.2.1 Influence de la fraction volumique d'inclusions f_v	124
III.3.2.2 Influence de la taille des inclusions.....	125
III.3.2.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions.....	125
III.3.2.4 Comportement des sols modèles à la rupture.....	129
III.3.3 Influence de l'état de compacité de la matrice.....	130
III.5 Conclusions	134
 CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES SOLS GROSSIERS A LA GRANDE BOÎTE DE CISAILLEMENT DIRECT.....	 135
IV.1. Programme expérimental	135
IV.2. Résultats typiques et vérification de la répétabilité des essais.....	137
IV.2.1 Résultats typiques.....	137
IV.2.2 Répétabilité des essais	138
IV.3 Influence des paramètres d'étude	140
IV.3.1. Influence de la fraction volumique f_v des inclusions.....	140
IV.3.2. Influence de la taille des inclusions	144
IV.3.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions	146

IV.4. Critère de rupture – Angle de frottement interne	151
IV.5. Comparaison entre les résultats issus de l'appareil triaxial Ø300 mm et ceux issus du dispositif de cisaillement direct de grandes dimensions (300 x 300 x 180 mm³)	155
IV.5.1 Cas du mélange avec des inclusions 8/10 mm.....	155
IV.5.2 Cas du mélange avec des inclusions 10/20 mm.....	157
IV.6. Conclusions	160
 CHAPITRE V : PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES SOLS GROSSIERS A MATRICE	 162
V.1. Réflexion sur l'écrêtement et la substitution	162
V.1.1 Méthode d'écrêtement	162
V.1.2 Méthode de substitution.....	164
V.1.3 Conclusion	166
V.2. Proposition d'une nouvelle méthode	166
V.2.1 Effet de la taille d_{\max} des inclusions	166
V.2.2 Effet de l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max}	167
V.2.3 Effet de la fraction volumique des inclusions (f_v).....	168
V.2.4 Méthode proposée.....	170
V.3. Application et évaluation de la méthode proposée à un sol grossier naturel	173
V.3.1 Application de la méthode proposée	173
V.3.2 Caractérisation du sol grossier naturel à l'appareil triaxial (Ø 300 mm)	183
V.3.3 Comparaison entre les résultats obtenus sur le sol complet et les résultats obtenus sur les sols écrêtés	184
V.3.4 Évaluation de la méthode proposée.....	185
V.4. Conclusions	186
CONCLUSION GENERALE	187
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	189
LISTE DES SYMBOLES.....	193

INTRODUCTION GENERALE

Les sols grossiers, sont souvent rencontrés dans la nature, en particulier dans les zones montagneuses. Ces sols sont composés d'un mélange d'éléments de natures différentes et de tailles variables, pouvant aller de quelques fractions de microns (particules d'argile) à plusieurs dizaines de centimètres (par exemple, blocs de rocher dans les moraines glacières). Les sols grossiers à matrice constituent un cas particulier des sols grossiers. Ces derniers sont constitués d'inclusions (macro-éléments) de tailles variables au sein de matrices fines, à dominante sableuse, limoneuse, ou argileuse. La présence des gros éléments, dans ces sols grossiers à matrice, constitue une problématique importante, en ce qui concerne leur caractérisation mécanique. En particulier, il n'existe pas encore d'outil fiable permettant de prendre en compte ces sols de manière vraiment rationnelle dans les projets, en vue du calcul et du dimensionnement d'ouvrages (paramètres de déformabilité, critère de rupture, etc ...).

Les objectifs de notre travail de recherche sont de contribuer à l'amélioration de la connaissance du comportement mécanique des sols grossiers à matrice, et de proposer une procédure rationnelle de caractérisation de leur comportement mécanique.

En vue d'atteindre ces objectifs, il est important de comprendre l'effet des gros éléments dans ces sols. Pour cela, nous travaillerons sur des sols grossiers de référence à matrice sableuse, en vue de mieux comprendre l'effet des inclusions sur le comportement mécanique des mélanges.

Ces travaux s'inscrivent dans le prolongement des recherches développées dans le cadre de la thèse de Pedro [2004]. Ces travaux rentrent également dans le cadre du projet de coopération bilatéral franco-libanais CEDRE entre l'ENPC-CERMES et l'Université Libanaise, Faculté de Génie, Beyrouth.

Ce mémoire est divisé en 5 chapitres :

- le premier chapitre présente l'étude bibliographique. On met l'accent sur les essais de caractérisation des sols grossiers *in situ* et en laboratoire et sur les méthodologies de reconstitution pour déterminer le comportement mécanique à l'aide des dispositifs de

laboratoire de taille classique. On présente également quelques résultats obtenus sur les effets des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique des sols grossiers ;

- le deuxième chapitre présente les dispositifs expérimentaux de laboratoire et la procédure expérimentale utilisés dans le cadre de notre recherche. Le premier dispositif est l'appareil triaxial de grand diamètre développé au CERMES, qui permet de tester des éprouvettes de sol de 300mm de diamètre et de 600mm de hauteur. Le deuxième dispositif est la grande boîte de cisaillement direct, développée à l'université Libanaise, qui permet, aussi, de tester de grosses éprouvettes parallélépipédiques de sols de 300mm de côté et de 180mm de hauteur ;
- Le troisième chapitre consiste à caractériser le sol grossier de référence utilisé à l'aide de l'appareil triaxial de grande taille (\varnothing 300 mm). Dans ce chapitre on examine l'effet des paramètres fondamentaux (fraction volumique, taille et étalement granulométrique des inclusions et état de densité de la matrice) ainsi que l'effet de la contrainte de consolidation initiale sur le comportement mécanique observé ;
- Le quatrième chapitre présente la caractérisation du sol grossier de référence à la grande boîte de cisaillement direct. Dans ce chapitre, nous étudions également l'effet paramètres fondamentaux (fraction volumique, taille et étalement granulométrique des inclusions), suivi par une étude comparative des résultats obtenus sur ces deux dispositifs pour évaluer l'un par rapport à l'autre ;
- Le cinquième chapitre présente la méthodologie proposée qui permet d'estimer le comportement mécanique à la rupture des sols grossiers à matrice à l'aide des dispositifs de laboratoire de taille classique, suivi par une application de cette méthode sur un sol grossier naturel.

CHAPITRE I : ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Les sols grossiers sont fréquemment rencontrés en zone montagneuse. Ils sont constitués d'un mélange de gros éléments appelés inclusions (cailloux, graviers ...) et d'un sol fin appelé matrice (sable, limon, argile). Le comportement géomécanique de ces sols est difficile à appréhender par les méthodes de géotechnique classiques, principalement en raison de la présence de gros éléments qui perturbent ou empêchent la réalisation des essais.

Il existe deux types d'essais pour caractériser les sols grossiers qui sont les essais en laboratoire et les essais *in situ*.

Dans l'étude bibliographique, on commence tout d'abord à définir les sols grossiers, ensuite on va décrire les différents moyens de caractérisation des sols grossiers, et les principaux résultats obtenus.

L'étude bibliographique porte principalement sur l'analyse du comportement mécanique des sols grossiers, en s'intéressant à la taille des gros éléments qui est généralement une source de difficultés. On présentera donc les différentes possibilités de détermination de la résistance au cisaillement d'un sol grossier et les facteurs qui influent sur les résultats. Les facteurs sont les suivants :

- influence de la taille des inclusions ;
- influence de la proportion d'inclusions ;
- effet morphologique des inclusions.

Il faut ajouter à ces paramètres, l'effet d'échelle (dimension des éprouvettes/taille des particules du sol) et du type de dispositif (triaxial, boîte de cisaillement).

Enfin on va présenter les méthodologies de caractérisation des sols grossiers actuellement utilisées, à l'aide des appareils de taille classique au laboratoire.

I.1 Définitions des sols grossiers – Méthodes et dispositifs d'essai

I.1.1 Définitions

En général, dans les classifications utilisées en mécanique des sols, le terme "sol grossier" n'existe pas. Plusieurs classes de sols pourraient correspondre à un sol grossier. Dans les travaux recensés dans la littérature, chaque chercheur définit différemment les sols grossiers, ainsi que les limites de taille des particules qui les composent en fonction des essais *in situ* ou en laboratoire menés sur ces sols.

Dans le cadre d'essais de résistance au cisaillement de matériaux grossiers en laboratoire à partir de la boîte de cisaillement (200 x 200 x 100 mm), Nichiporovitch et Rasskazov [1967] ont défini la taille maximale des particules des sols grossiers à 50 mm.

Perrot [1968] a défini les sols grossiers par les sols qui contiennent plus de 50 % d'éléments de taille supérieure à 2 mm. La taille maximale des éléments étant quelconque.

Une grave naturelle alluvionnaire de granulométrie 0/200 mm a été utilisée par Valle [1998] et Valle [2001]. Celui-ci a effectué des essais à l'essai triaxial et à la boîte de cisaillement direct pour définir les caractéristiques de ce sol grossier.

Dans le cadre de l'étude de comportement des sols grossiers, Pedro [2004] a utilisé une grave alluvionnaire en tant que sol grossier naturel (Figure I. 1).

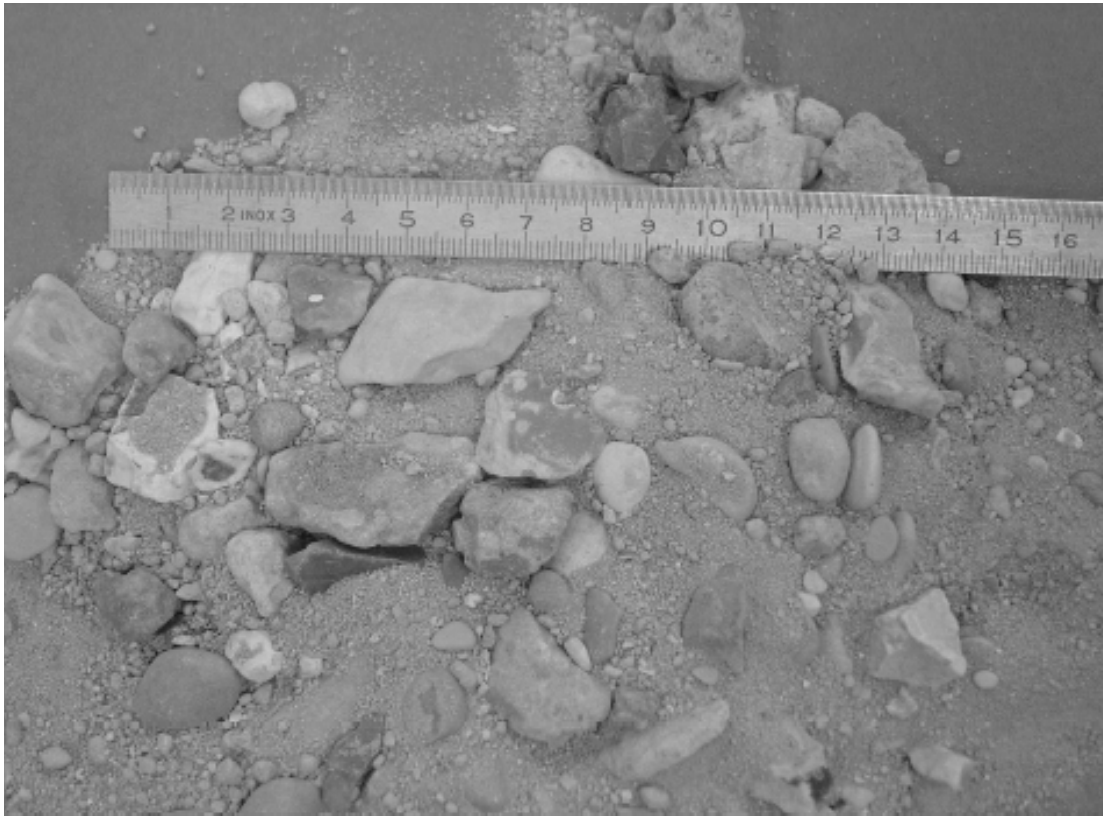


Figure I. 1 : Vue de la grave alluvionnaire 0/20 mm (Pedro [2004])

Les différents matériaux grossiers utilisés pour les travaux expérimentaux sont d'origine alluviale, torrentielle ou en provenance d'éboulis de montagne.

Il s'agit de matériaux obtenus en mélangeant des éléments de tailles et de natures diverses. Ces sols grossiers sont ainsi reconstitués afin d'étudier l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique de ces sols, comme la proportion et la taille des grosses inclusions. Nous citons en particulier les travaux de Holtz et Willard [1961], Donagh et Torrey [1979] et Pedro [2004].

Holtz et Willard [1961] ont utilisé comme sols grossiers des mélanges de sols graveleux (Figure I. 2). Les sols argileux étaient mélangés à certains pourcentages de graviers de classe granulaire 76,2 mm (3 pouces). Les particules de graviers étaient surtout composées de gneiss, de granite et schiste issus d'un dépôt de rivière. La masse volumique de la partie argileuse varie de $2,66 \text{ g/cm}^3$ à $2,70 \text{ g/cm}^3$. Ils ont aussi mélangé des sables et plusieurs pourcentages de graviers de taille maximale égale à 76,2 mm (Figure I. 3).

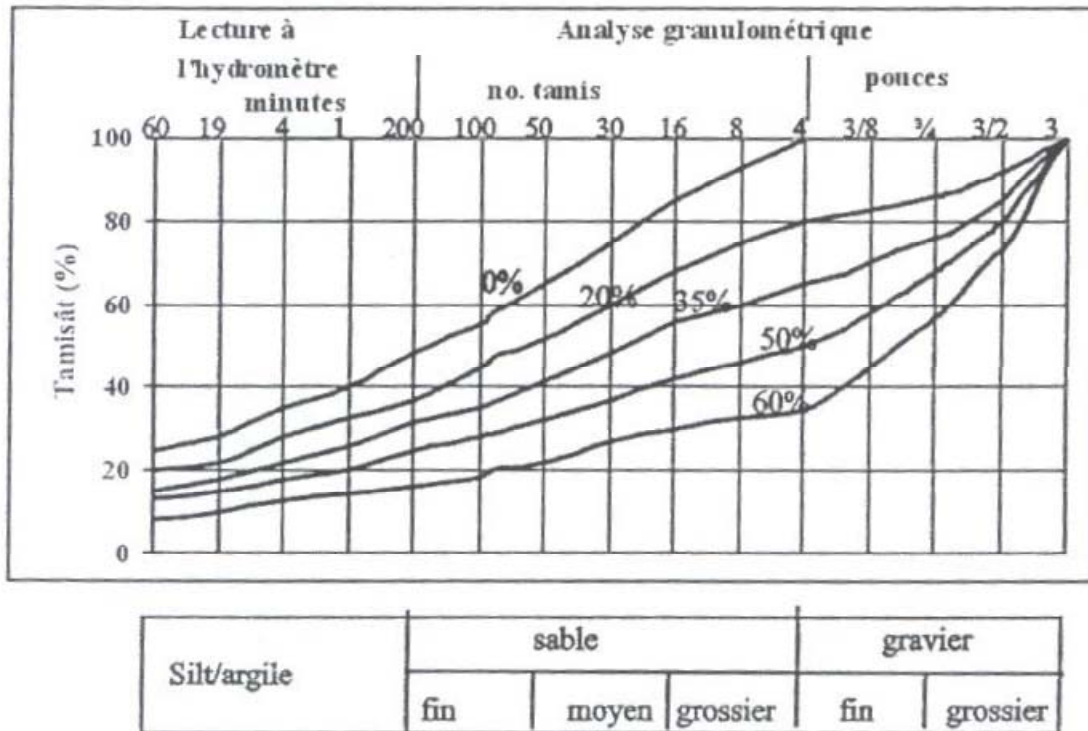


Figure I. 2 : Granulométries des sols graveleux-argileux retenus par Holtz et Willard [1961] d'après Afriani [2003]

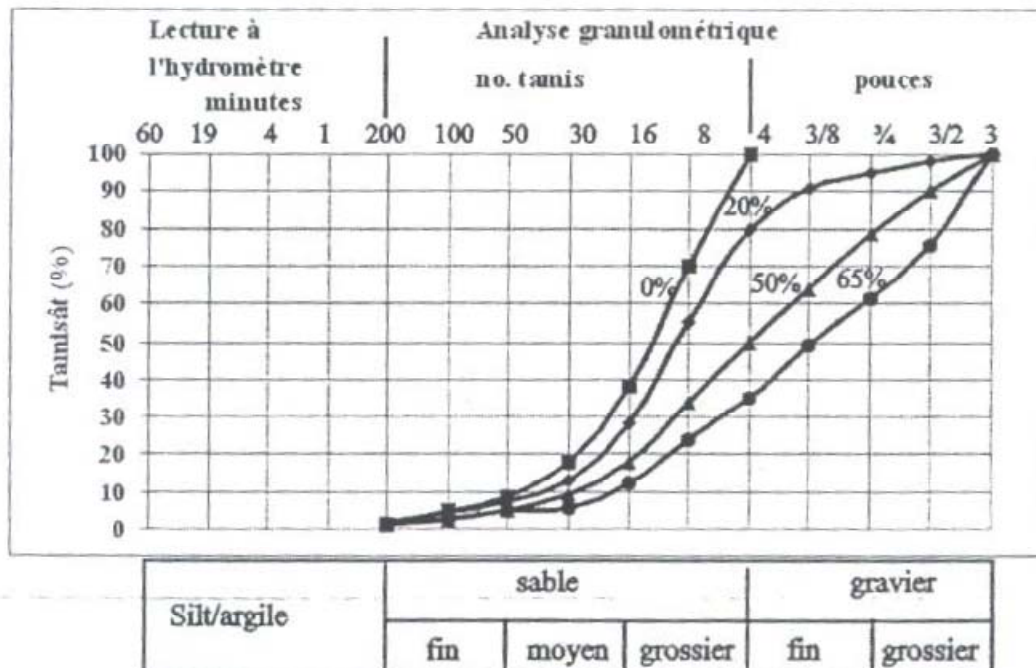


Figure I. 3 : Granulométries des sols graveleux-sableux retenus par Holtz et Willard [1961] d'après Afriani [2003]

Pedro [2004] a également étudié le comportement de sols grossiers de référence constitués d'inclusions de grande taille dans une matrice sableuse. Il a choisi les inclusions de façon que le rapport entre la taille moyenne des constituants de la matrice ($d_{50,mat}$) et celle des inclusions ($d_{50,incl}$), $d_{50,incl}/d_{50,mat}$ soit supérieur à 10 et le rapport entre le diamètre de l'éprouvette et la taille maximale des inclusions soit supérieur à 10.

On peut dire en conclusion qu'il n'existe pas de définition précise des sols grossiers, mais on peut dire que ces sols possèdent les caractéristiques principales suivantes :

- une granulométrie étalée ;
- des éléments de taille importante.

I.1.2 Méthodes et dispositifs d'essai

Pour étudier le comportement mécanique des sols grossiers et estimer leur résistance au cisaillement, il existe deux approches qui utilisent :

- les essais *in situ* ;
- les essais de laboratoire.

I.1.2.1 Essais *in situ*

L'évaluation du comportement mécanique des sols grossiers à partir des essais *in situ* peut être réalisée à l'aide de différents dispositifs, qui sont :

- le pressiomètre ;
- le phicomètre ;
- la boîte de cisaillement *in situ*.

Différents auteurs ont étudié le comportement des sols grossiers à l'aide des essais *in situ*. On citera, en particulier, les travaux de Ménard (1961), Nichiporovitch et Rasskazov (1967), Jain et Gupta (1974), Philipponnat (1986), Philipponnat et Zerhouni (1993), Combarieu (1995), Bourdeau (1997), Shirdam (1998), Shirdam, Faure, Magnan (1998), Valle (2001). Ces études ont montré que la caractérisation *in situ* des sols grossiers nécessite l'utilisation d'essais spécifiques et de dispositifs expérimentaux de grandes dimensions. L'utilisation de ce type d'essais pose des problèmes relatifs à leur exécution et à l'interprétation des résultats obtenus.

En effet, pour tester sur site un volume représentatif, on est confronté aux difficultés suivantes:

- les procédures d'essais sont longues car les dispositifs d'essais ont de grandes dimensions ;
- l'interprétation de ces essais est un problème de mécanique aux conditions aux limites mal définies. Pour interpréter les résultats de certains essais *in situ*, comme les essais de propagation d'ondes, on est obligé de faire l'hypothèse que le milieu est homogène. Dans le cas des sols grossiers, cette hypothèse est discutable ;
- le coût des essais *in situ* est, en général, élevé.

Cette dernière difficulté tend à préférer les essais en laboratoire, au coût généralement plus faible. On trouvera plus de détails sur les essais *in situ* et les résultats obtenus par différents auteurs dans le mémoire de Pedro [2004].

1.1.2.2 Essais de laboratoire

Le comportement mécanique des sols grossiers peut être obtenu à l'aide des deux dispositifs principaux suivants :

- la boîte de cisaillement direct;
- l'appareil triaxial.

a) Essai à la boîte de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct à la boîte consiste à cisailer l'éprouvette de sol, qui est placée entre deux demi boîtes, suivant un plan imposé, sur lequel on exerce une force normale N et une force tangentielle T (Figure I. 4). La demi boîte inférieure peut se déplacer horizontalement, à vitesse de déplacement constante.

Cet essai permet de représenter la résistance au cisaillement du sol par une relation entre la contrainte tangentielle τ (T/S) et la contrainte normale σ_N (N/S) sur la surface de rupture (S : surface de l'éprouvette).

Plusieurs auteurs ont utilisé la boîte de cisaillement direct (Terzaghi et Peck [1965], Nichiprovitch et Rasskazov (1967), LCPC [1987], Bourdeau [1997], Magnan [1998], Shirdam [1998], Valle [2001], Afriani [2003]).

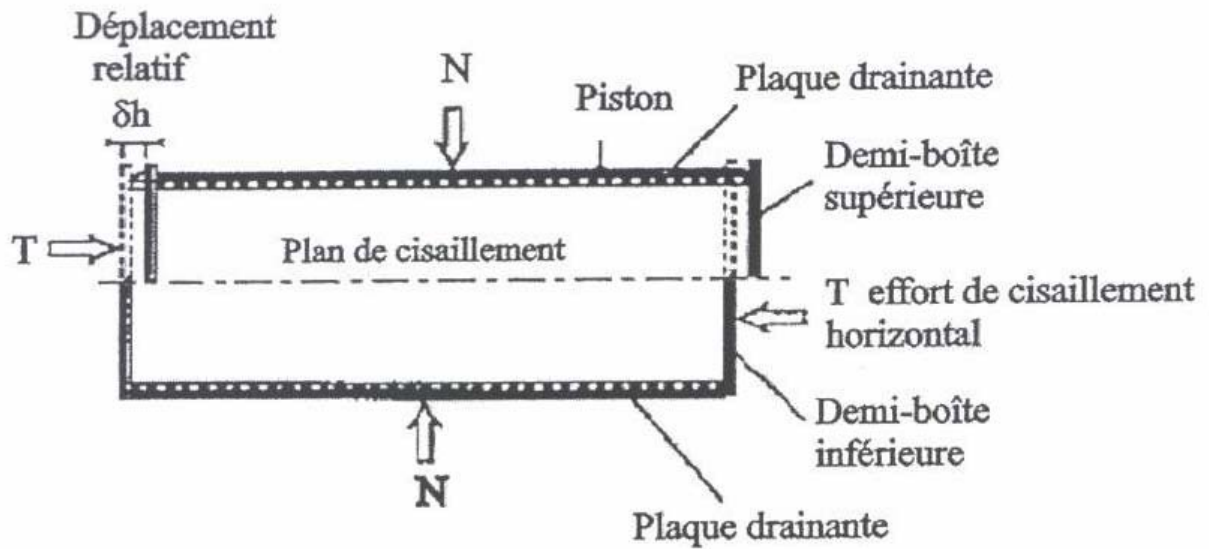


Figure I. 4: Schéma de principe de la boîte de cisaillement direct linéaire.

Nichiprovitch et Rasskazov [1967] ont réalisé des essais à l'aide d'une boîte de cisaillement de 1600 mm de longueur, de 1000 mm de largeur et de 820 mm de hauteur.

Shirdam [1998] a utilisé la grande boîte de cisaillement du CETE de Lyon, de diamètre \varnothing 600 mm et de hauteur $h = 300$ mm (Figure I. 5).

Valle [2001] a étudié le comportement d'un sol grossier provenant d'une terrasse alluvionnaire de la Seine à l'aide de deux boîtes de cisaillement, dont les dimensions sont 250 x 250 x 200 mm et 500 x 500 x 300 mm. Ces deux dispositifs ont été utilisés également par Afriani [2003].

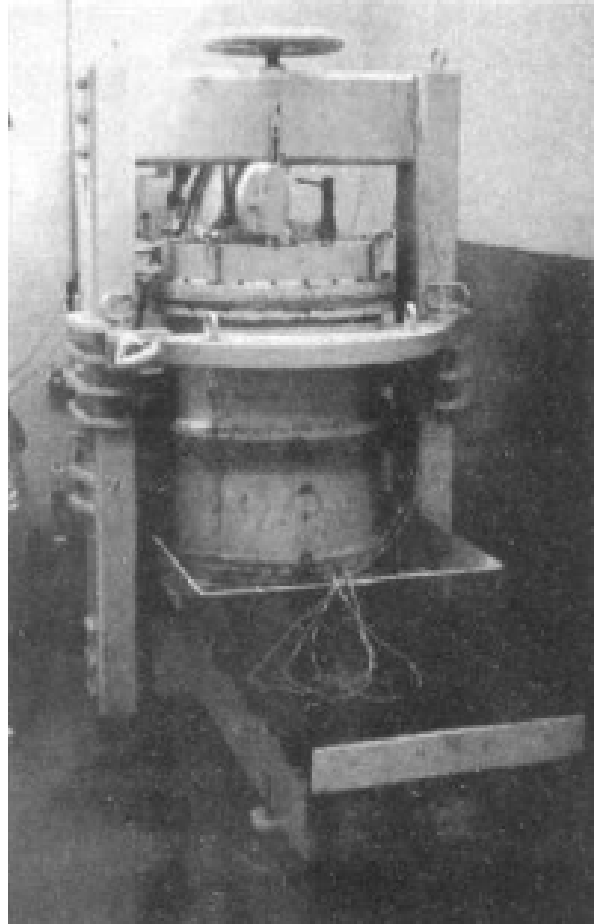


Figure I. 5: Vue de la grande boîte de cisaillement du CETE de Lyon (Shirdam et al. [1998])

b) Essai à l'appareil triaxial

L'essai triaxial, comme l'essai de cisaillement à la boîte, permet de déterminer la résistance au cisaillement du sol. L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de sol, à un champ de contrainte uniforme qui a pour composantes :

- une pression de confinement isotrope, appliquée par l'intermédiaire d'un fluide (généralement de l'eau) remplissant la cellule ;
- un déviateur de contrainte axial, appliqué par l'intermédiaire d'un piston.

L'essai consiste à faire croître le déviateur de contrainte jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'état de contrainte résultant sur l'éprouvette est principal, avec une contrainte principale majeure σ_1 appliquée axialement et une contrainte principale mineure σ_3 appliquée latéralement (cas de la compression, Figure I. 6)

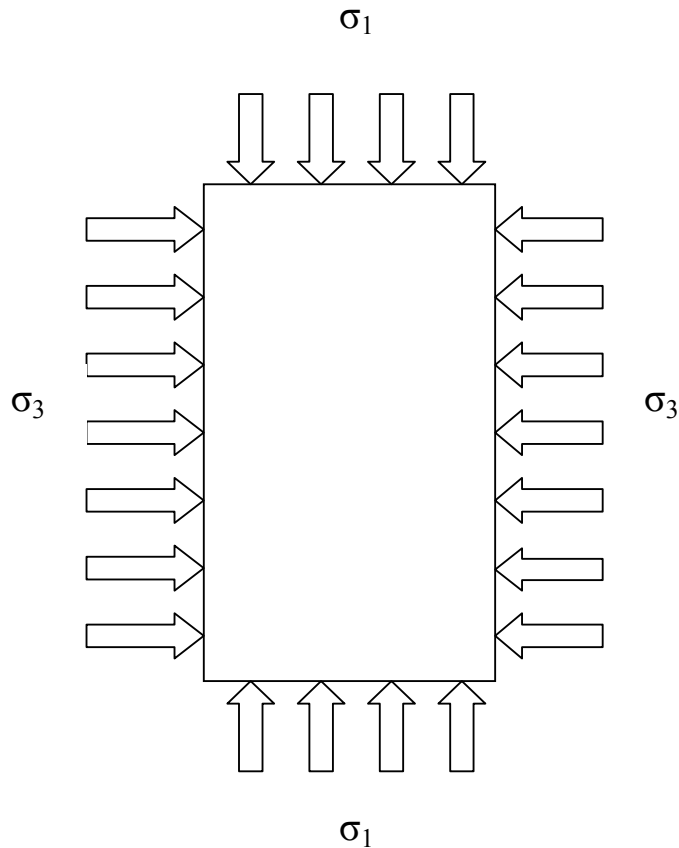


Figure I. 6: Schématisation de l'état des contraintes dans une éprouvette à l'appareil triaxial.

Plusieurs auteurs ont utilisé l'appareil triaxial de grande dimension pour étudier le comportement des sols grossiers, et, en particulier, Holtz et Willard [1961], Valle [2001], et Pedro [2004].

Holtz et Willard [1961] ont utilisé un appareil triaxial de 230 mm de diamètre et de 570 mm de hauteur.

Valle [2001] a étudié la résistance au cisaillement d'un sol grossier issu d'une terrasse alluvionnaire à l'aide d'un appareil triaxial de 152mm de diamètre et de 304 mm de hauteur.

Pedro [2004] a utilisé deux appareils pour caractériser les sols grossiers, un de grandes dimensions (hauteur $h = 600\text{mm}$ et diamètre $\varnothing = 300\text{mm}$) et l'autre de dimensions moyennes (hauteur $h = 200\text{mm}$ et diamètre $\varnothing = 100\text{mm}$) (Figure I. 7).



Figure I. 7 : Vue de l'appareil triaxial Ø 100 mm (Pedro (2004))

I.2 Influence de paramètres de base sur les caractéristiques mécaniques des sols grossiers

Pour améliorer la connaissance du comportement mécanique des sols grossiers et en vue de proposer une procédure rationnelle de caractérisation du comportement mécanique de ces sols, il faut étudier l'effet des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique de ces sols. On présente, dans ce qui suit, les principaux résultats obtenus dans le cadre de recherches antérieures.

I.2.1 Influence de paramètres liés aux dispositifs

I.2.1.1 Effet de taille des appareils de cisaillement

Comme on l'a vu dans la partie I.1.2.2, il existe des dispositifs d'essais de taille variable, et des sols dont la granulométrie peut être étroite ou étalée. Le choix du volume de sol à tester est limité par les dimensions des dispositifs d'essais.

On définit donc, le rapport de taille : \emptyset/d_{\max} dans le cas de l'appareil triaxial et L/d_{\max} dans le cas de la boîte de cisaillement, avec

\emptyset, D_0 : diamètre de l'éprouvette utilisée dans l'essai triaxial (mm) ;

d_{\max} : diamètre maximal des grains (mm) ;

L : longueur de la boîte de cisaillement.

Nous présentons quelques résultats trouvés dans la littérature, en mettant l'accent sur les effets de rapport de taille observés sur le comportement mécanique de différents sols grossiers.

a) Cas des dispositifs triaxiaux

Beaucoup de chercheurs ont utilisé différents types d'appareils de taille variable pour étudier l'effet d'échelle géométrique des appareils de cisaillement.

L'effet de la taille des éprouvettes sur le comportement d'une alluvion fluvatile a été étudié par Holtz et Gibbs [1956]. La Figure I. 8 présente les courbes granulométriques des matériaux étudiés. Le premier contient 50 % de graviers et le second contient 20 % de graviers. Les auteurs ont effectué les essais sur une fraction fine du matériau (0/4,76 mm) et sur une fraction plus grossière de 0/19 mm. Ils ont utilisé quatre tailles d'éprouvette : 35 mm ; 82,5 mm ; 152 mm et 229 mm de diamètre. La Figure I. 9 montre que l'angle de frottement varie peu avec un rapport de taille \emptyset/d_{\max} supérieur à 4. Et, par conséquent, une éprouvette dont le diamètre est seulement 4 fois plus grand que d_{\max} semble suffisante pour ne pas avoir d'effet de la taille du dispositif.

Cependant Fukuoka [1957] montre que les caractéristiques de rupture d'une petite éprouvette ($\emptyset/d_{\max} = 4$) a des caractéristiques de rupture moins élevées qu'une grande éprouvette ($\emptyset/d_{\max} = 6$).

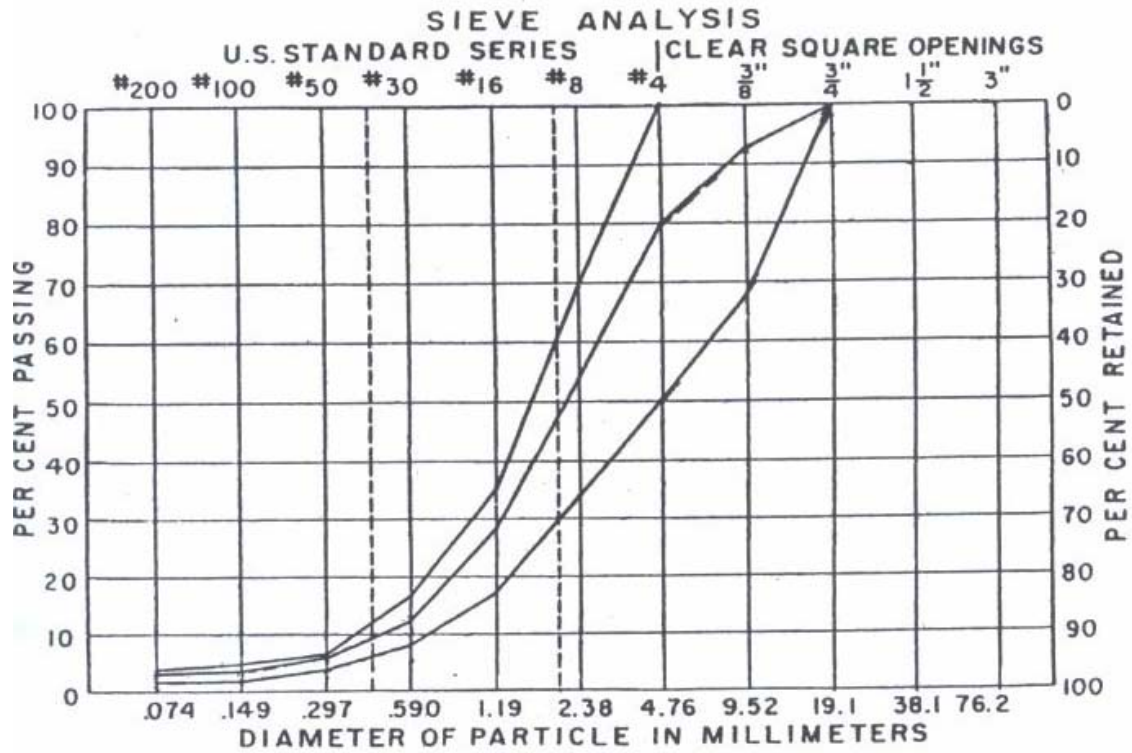


Figure I. 8 : Courbes granulométriques des matériaux étudiés par Holtz et Gibbs [1956]

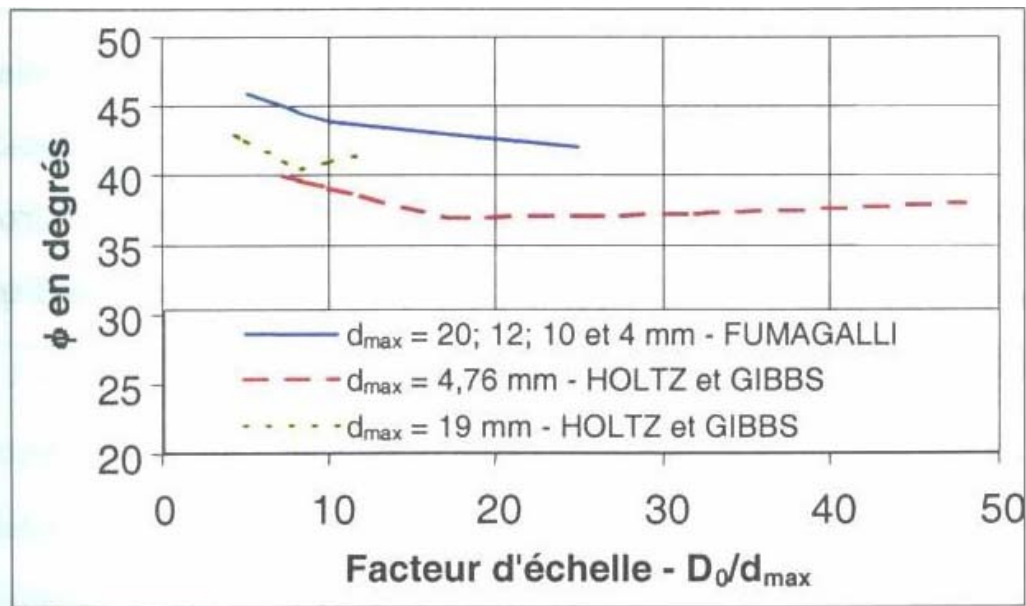


Figure I. 9: Influence du facteur d'échelle (d'après Fumagalli, 1969, Holtz et Gibbs 1956).

Fumagalli [1969], a réalisé des essais triaxiaux avec un diamètre de l'éprouvette de 100 mm sur un granulat calcaire destiné à une industrie cimentière de Bergame. Les résultats sont présentés dans le Tableau I. 1.

\varnothing (mm)	d_{\max} (mm)	\varnothing / d_{\max}	φ (°)
100	20	5	46
100	12	8,3	44,3
100	10	10	44
100	4	25	42

Tableau I. 1 : Influence de la taille des éprouvettes (d'après Fumagalli [1969])

Fumagalli a obtenu une réduction de l'angle de frottement interne avec l'augmentation du rapport \varnothing/d_{\max} (Figure I. 10 et Figure I. 11)

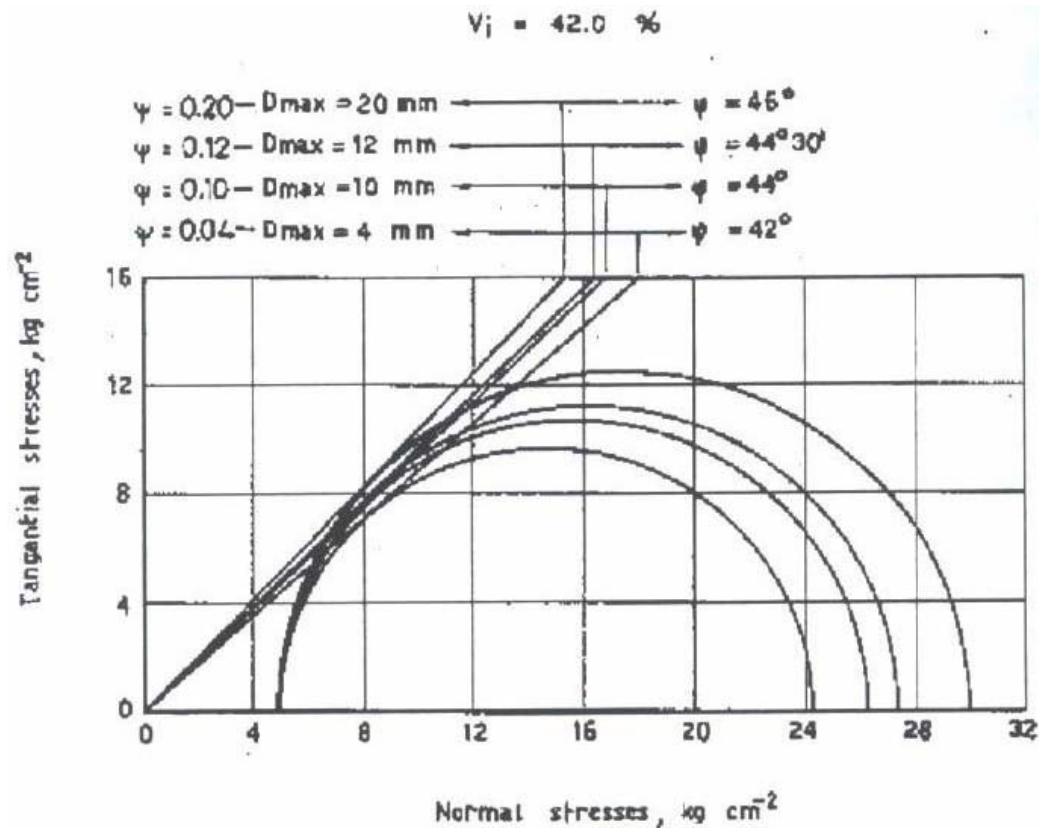


Figure I. 10: Cercles de Mohr de rupture déduits d'essais triaxiaux pour différentes valeurs de ψ , où $\psi = d_{\max}/\varnothing$ (Fumagalli [1969])

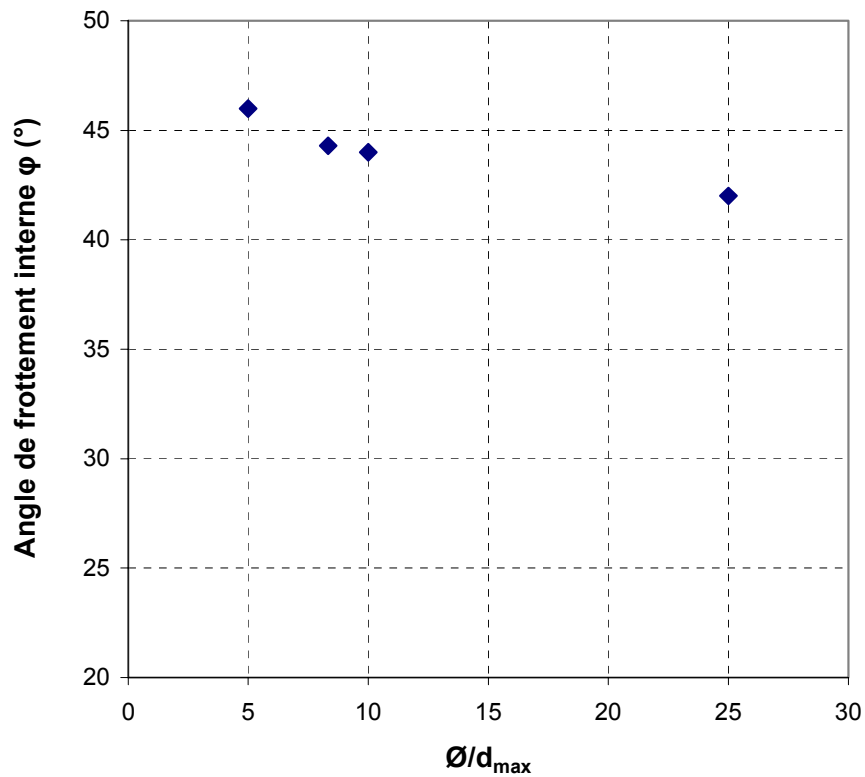


Figure I. 11 : Influence du rapport \varnothing/d_{\max} sur les caractéristiques de rupture du sol (d'après Fumagalli [1969])

Pedro [2004] a réalisé deux essais triaxiaux pour étudier l'influence de la taille de l'éprouvette, un essai sur des éprouvettes de grandes dimensions (300 mm de diamètre et de 600 mm de hauteur) et l'autre sur des éprouvettes de dimensions plus réduites : 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur). Le mélange testé est constitué de sable de Fontainebleau et de 20 % de gravier 8/10 mm. Les conditions initiales d'essai étaient les mêmes pour les deux essais triaxiaux menés.

Cet auteur a constaté que, aussi bien en terme de résistance au cisaillement, qu'en terme de variation de volume, le comportement des éprouvettes (matrice + 20 % graviers 8/10 mm) est le même, quelles que soient les dimensions de l'éprouvette (Figure I.12).

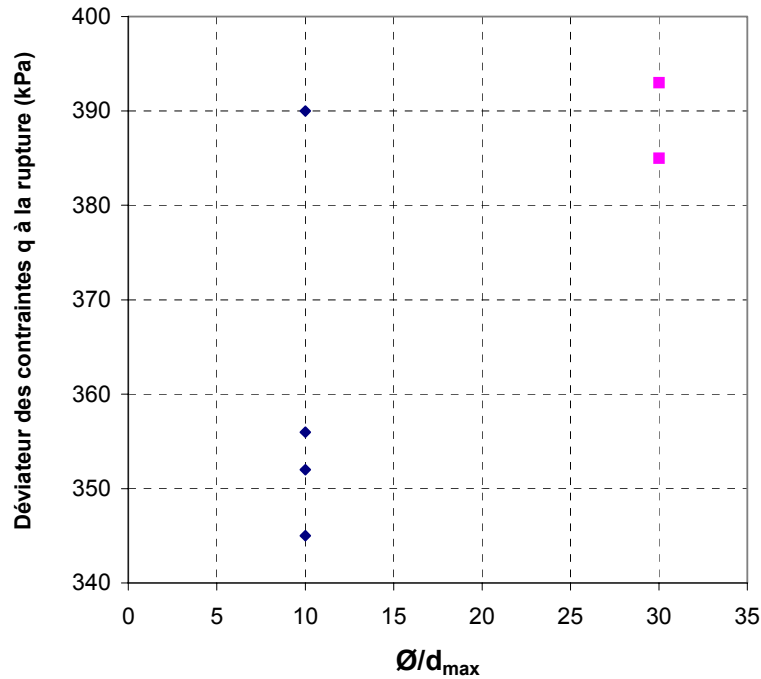


Figure I.12: Effet du rapport \emptyset/d_{\max} sur les caractéristiques de rupture (d'après Pedro [2004])

En général, les auteurs qui ont effectué des essais triaxiaux sur des sols grossiers respectent un rapport de taille minimum de 5 à 6 (Leslie [1963] ; Marchi, Chan et Seed [1972] ; Valle [2001]).

b) Cas des essais à la boîte de cisaillement direct

De nombreux auteurs ont également étudié l'influence du rapport (L/d_{\max} ou L_0/d_{\max} avec, L et L_0 : longueur ou côté de la boîte de cisaillement direct) sur le comportement mécanique des sols. Ils ont montré que ce rapport joue un rôle important dans la résistance au cisaillement d'un sol grossier.

Des essais de cisaillement direct dans des boîtes carrées de 1.2 m de côté, et rondes de 100 mm de diamètre, où le rôle de la taille de l'appareillage (L_0) est comparé à celui du diamètre de la plus grosse particule (d_{\max}) ont été réalisés par Fry *et al* [1989], sur un grès très friable avec un ciment siliceux, avec un diamètre maximal des particules de 160 mm. Les essais mettent en évidence la forte influence de la taille de l'appareillage sur les résultats obtenus. Cette influence sur l'angle de frottement est exprimée en fonction de L_0/d_{\max} . Les valeurs de L_0/d_{\max} varient de 8 à 240. L'angle de frottement décroît quand L_0/d_{\max} augmente et

se stabilise pour des valeurs de L_0/d_{\max} supérieures à 50. On obtient une forte augmentation de l'angle de frottement lorsque l'on se trouve à des valeurs de L_0/d_{\max} inférieures à 25 (Figure I. 13).

L'influence du paramètre L_0/d_{\max} sur les résistances de pic et de palier d'un matériau graveleux calcaire d'un d_{\max} de 25mm, avec un coefficient d'uniformité et un poids volumique sec constants, a été étudiée par Santos, Martinez et Garcia [1993]. A partir d'un matériau ayant un d_{\max} de 25 mm, ces auteurs ont préparé trois matériaux avec des courbes granulométriques parallèles pour faire des essais de cisaillement direct à la boîte de 300 mm de côté. Des essais de cisaillement direct sur un sable ont également été réalisés dans des boîtes carrées de 300mm et de 60 mm de côté. Une diminution de 18° pour la valeur ϕ_{pic} et de 12° pour la valeur de ϕ_{palier} a été constatée quand le paramètre L_0/d_{\max} passe de 30 à 150. Les auteurs concluent qu'un rapport L_0/d_{\max} inférieur à 25 produit un effet d'échelle qui affecte de façon appréciable les résultats (Figure I. 14).

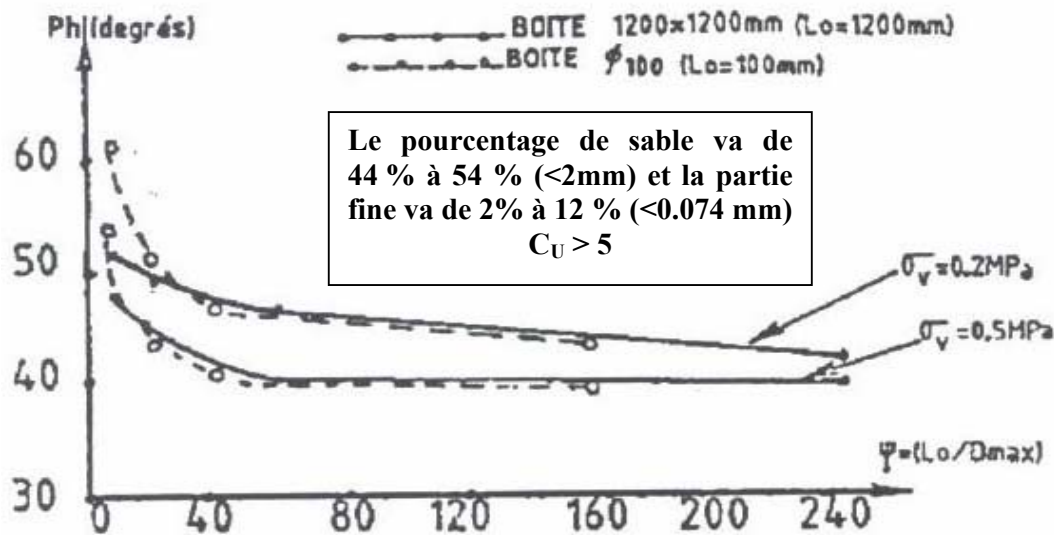


Figure I. 13: Angle de frottement interne en fonction du facteur d'échelle pour des essais de cisaillement direct (d'après Fry et Flavigny, 1989)

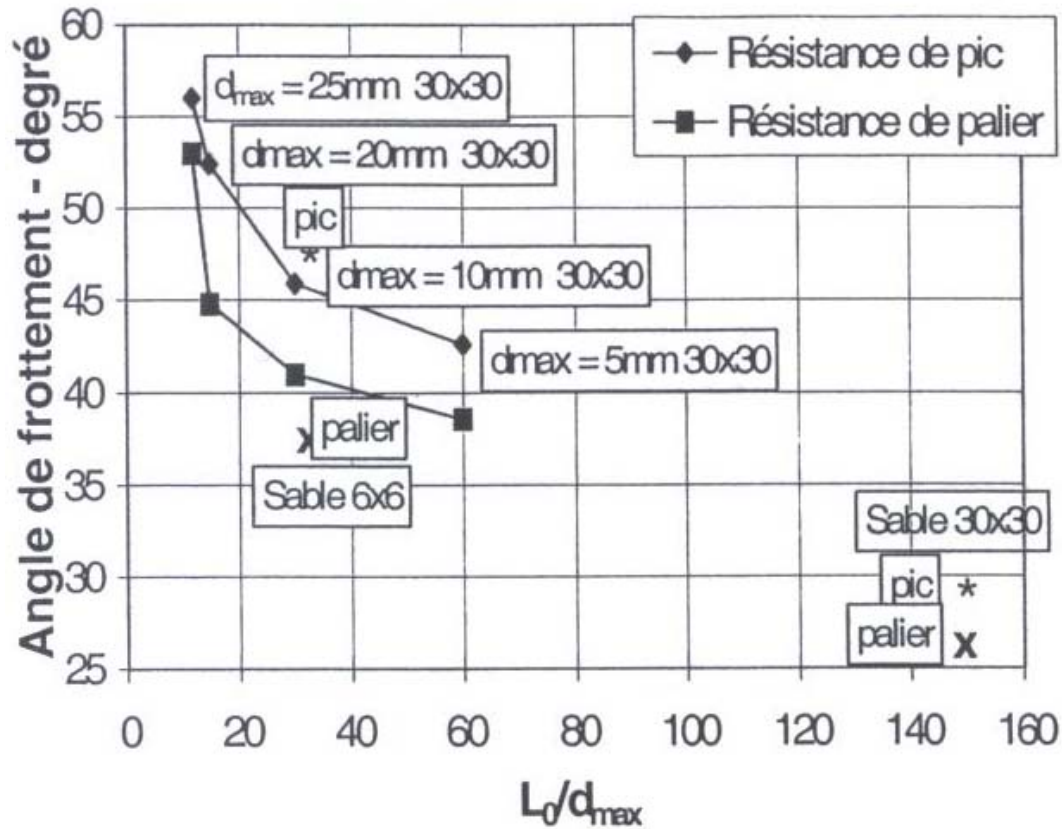


Figure I. 14: Variation de l'angle de frottement en fonction de L_0/d_{max} – Essais de cisaillement direct à la boîte (d'après Santos et al., 1993).

Valle [2001] a étudié l'influence de la résistance au cisaillement en fonction de la taille de la boîte pour des sols écrêtés dont le d_{max} est 25 mm, à l'aide de trois boîtes de cisaillement, dont les longueurs des côtés valent respectivement 100 mm, 250mm et 500mm. Il observe que les deux plus grandes éprouvettes (celles dont la longueur des côtés sont 25 et 50 fois plus grandes que d_{max} ont des caractéristiques de rupture à peu près identiques alors que les paramètres de rupture évalués en testant la petite éprouvette de 100 mm de côté sont plus élevés (Figure I. 15).

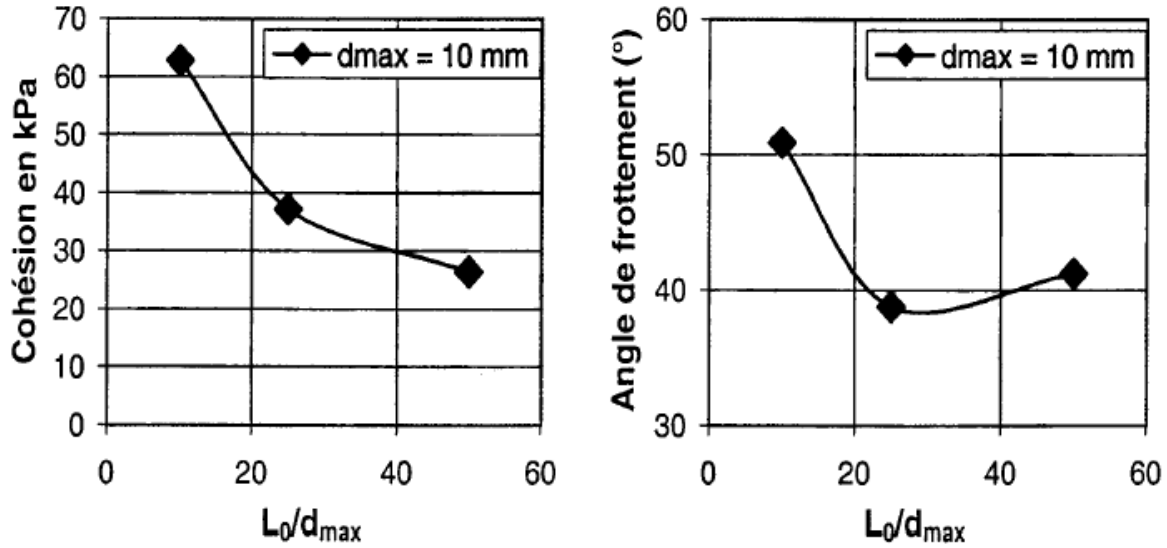


Figure I. 15: Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction du rapport de taille L_0/d_{max} (d'après Valle [2001])

Afriani [2003] a réalisé des essais sur l'effet d'échelle relatif aux dimensions de la boîte. Les essais sont effectués dans la grande boîte de cisaillement de 500 x 500 mm et dans la petite boîte de cisaillement de 250 x 250 mm en utilisant le matériau de réemploi (sol grossier de Criquebeuf-sur-seine issu du remblai au CER de Rouen, ayant subi un écrêtage à un diamètre maximum de 25 mm) et le sol naturel de Criquebeuf-sur-Seine (0/200 mm) avec un espacement de $t = 12\text{mm}$ entre les deux demi boîtes.

Elle a réalisé trois essais sur le matériau de réemploi et 5 essais sur le matériau naturel, avec 3 contraintes normales appliquées : 50 kPa, 100 kPa et 150 kPa.

Les résultats de ces essais, complétés par ceux de Valle [2001], sont donnés dans le Tableau I.

2.

Référence Essai	Boîte (mm x mm)	Matériau	c (kPa)	ϕ (°)	L/d_{max}	t/d_{max}
Afriani	500x500	de réemploi issu du remblai au CER de Rouen	46,70	35,80	20	0,48
Afriani	250x250	de réemploi issu du remblai au CER de Rouen	35,80	40,60	10	0,48
Afriani	250x250	naturel écrêté à 25 mm	48,40	42,10	10	0,48
Valle [2001]	500x500	naturel écrêté à 25 mm	48,20	37,60	20	0,48

Tableau I. 2 : Effet de la taille de la boîte sur les caractéristiques de rupture mesurées : Espacement t égal à 12 mm – d_{max} égal à 25 mm (d'après Afriani [2003]).

La Figure I. 16 présente les résultats obtenus. On observe que :

- pour le matériau de réemploi issu du remblai, la valeur de c augmente avec la dimension de la boîte alors que l'angle de frottement interne ϕ décroît. Les variations observées entre les boîtes de 500mm et de 250mm sont respectivement de 10.9 kPa et de 4.8 degrés ;
- pour le matériau naturel, la valeur de la cohésion varie peu pour les deux boîtes. Par contre, la valeur de l'angle de frottement est plus faible de 4.5 degrés pour la grande boîte.

Afriani en conclut que le rapport de taille a une influence sur la cohésion et sur l'angle de frottement mesurés à la boîte de cisaillement.

Sur la Figure I. 17, Afriani [2003] a rassemblé les différentes valeurs pour la cohésion et l'angle de frottement interne en fonction de la dimension de la boîte L . La plupart des résultats indiqués sont issus de travaux antérieurs relatés dans la bibliographie. Le diamètre maximal des grains varie de 5 mm jusqu'à 80 mm pour les différents matériaux étudiés.

A cause de la nature assez différente des matériaux étudiés, on observe une forte dispersion des résultats, surtout en ce qui concerne la cohésion. La cohésion diminue avec l'augmentation du rapport de taille (L/d_{\max}) et l'angle de frottement interne reste relativement constant pour toutes les tailles de boîte.

Pour les essais à la boîte de cisaillement, les rapports entre d_{\max} et la taille des éprouvettes sont variables selon les auteurs : Fukuoka [1957] et Bourdeau *et al.* [1989] utilisent des boîtes dont le côté est 5 et 7 fois plus grand que d_{\max} alors que Valle [2001], Shirdam *et al.* [1998] et Wiseman *et al.* [1987] utilisent des boîtes qui sont respectivement 20, 15 et 13 fois plus grandes que d_{\max} . Il semble donc que le volume du sol est représentatif si le rapport de taille est supérieur à 10.

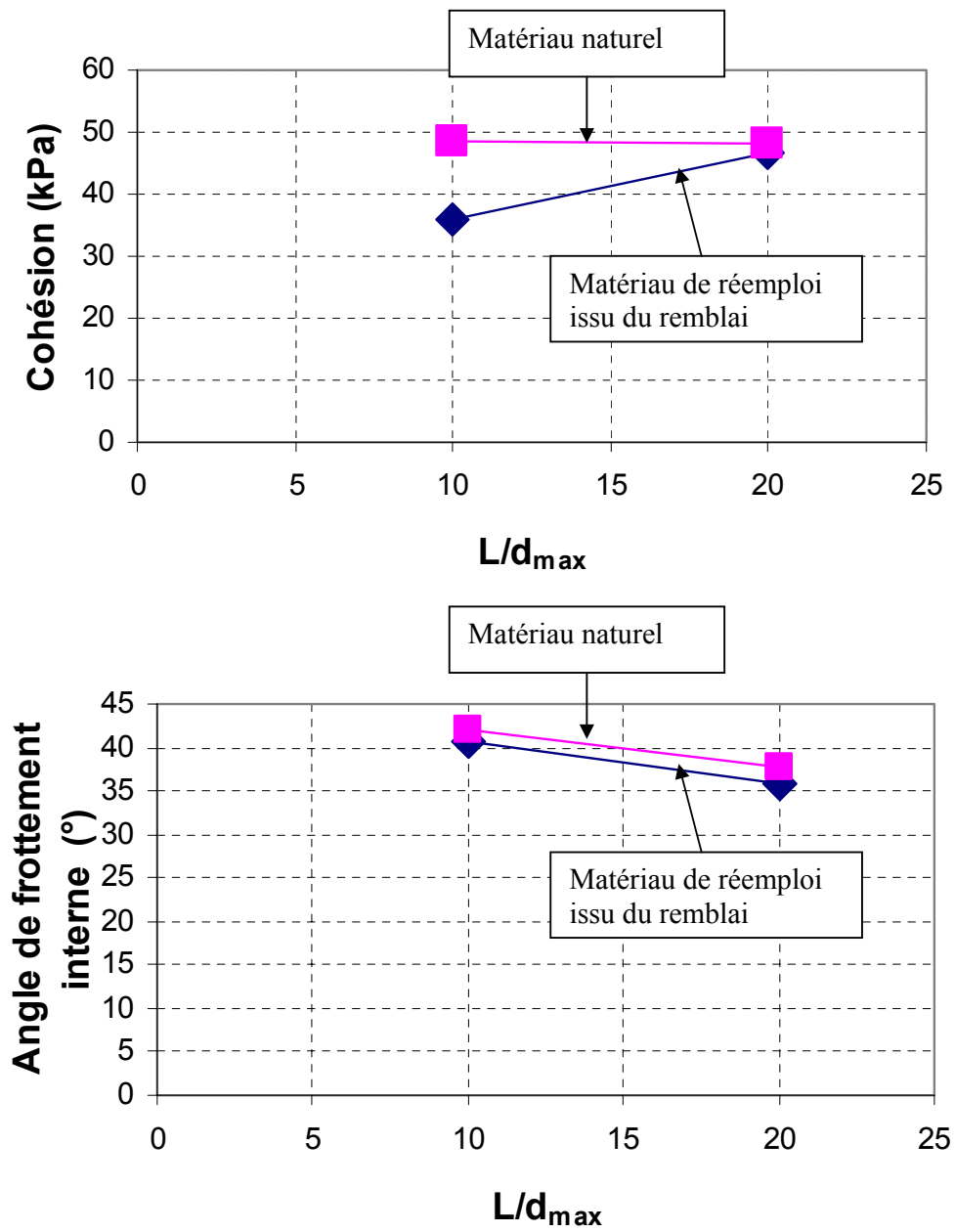


Figure I. 16 : Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction du rapport de taille (L/d_{max}) (d'après Afriani [2003])

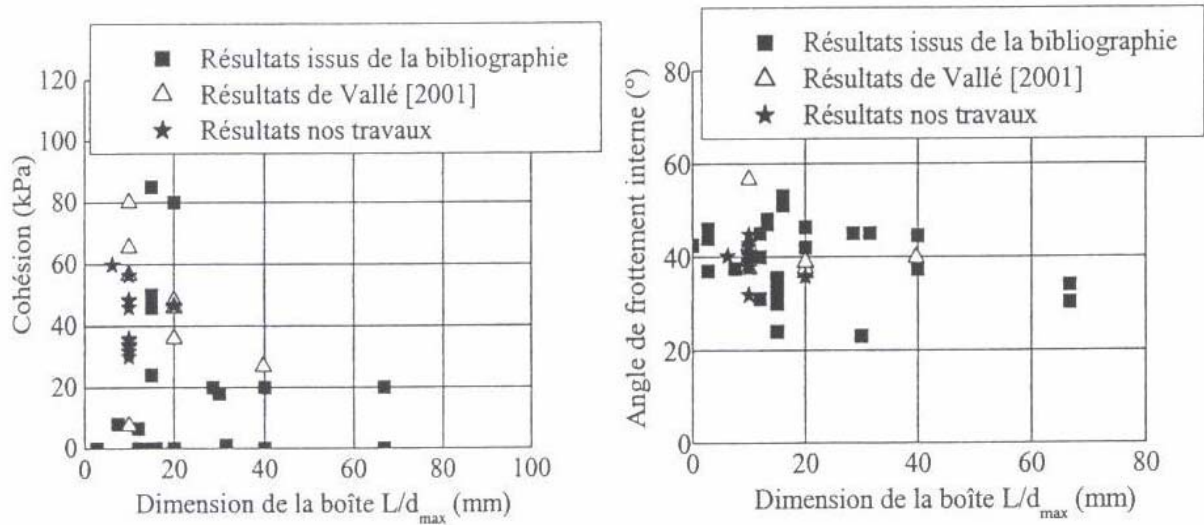


Figure I. 17: Influence de la dimension de la boîte sur la cohésion et l'angle de frottement pour différents d_{max} (Afriani [2003])

I.2.1.2 Influence de l'espacement entre les deux demi-boîtes de cisaillement

Il est intéressant de connaître l'effet de l'espacement entre les deux demi-boîtes sur le comportement mécanique des sols grossiers et, dans ce but, nous présentons les résultats de quelques auteurs qui ont travaillé sur ce sujet.

Shirdam [1998] a étudié l'influence de l'espacement entre les deux demi-boîtes à l'aide de la boîte de cisaillement direct de diamètre $\varnothing = 600\text{mm}$ et de hauteur $h = 300\text{mm}$ sur des éboulis écrêtés au tamis de 40mm . Il a réalisé deux séries d'essais avec deux espacements $t = 3\text{ mm}$ et $t = 20\text{ mm}$. Il a constaté que la cohésion c passe de 106 à 73 kPa quand t passe de 3 mm à 20 mm , alors que l'angle de frottement interne diminue de 1° (Figure I. 18). L'espacement a une influence sur la cohésion : l'augmentation de l'espacement conduit à la diminution de la cohésion c , par contre, l'angle de frottement change peu.

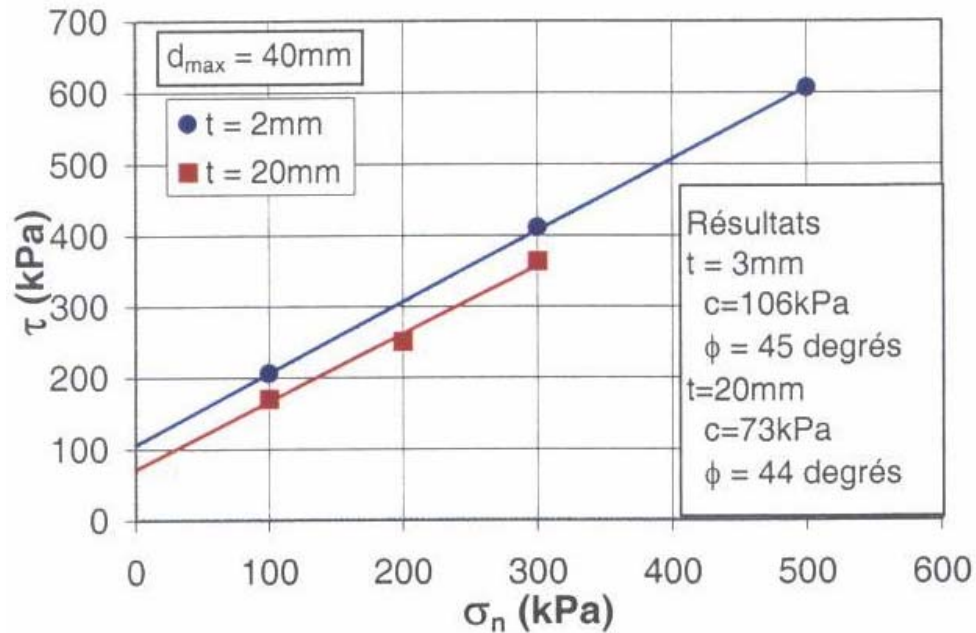


Figure I. 18: Influence de l'espacement entre les deux demi-boîtes sur la résistance au cisaillement-Matériau d'Oeillettes (d'après Shirdam et al. [1998])

Valle [2001] a réalisé des essais de cisaillement direct à la grande boîte sur le matériau grossier de la carrière de la Vallée Heureuse, qui est une grave calcaire naturelle de diamètre maximal de 90 mm. Il a réalisé des essais sur cette grave écrêtée à 60 mm et avec des espacements entre les deux demi-boîtes de 20 mm et de 45 mm. Il observe que les résultats sont identiques pour les deux espacements choisis (Figure I. 19).

Par ailleurs, Nichiporovich et Rasskazov [1967], Cruz et Nieble (1971) et Shirdam [1998] ont montré que l'espacement entre les deux demi-boîtes joue un rôle très important sur la valeur de la cohésion mesurée, au dessous de la valeur $d_{\max}/2$. A partir de l'ensemble de ces résultats, Valle a adopté un espacement de $d_{\max}/2$ entre les deux demi-boîtes pour réaliser ses essais à la boîte de cisaillement direct.

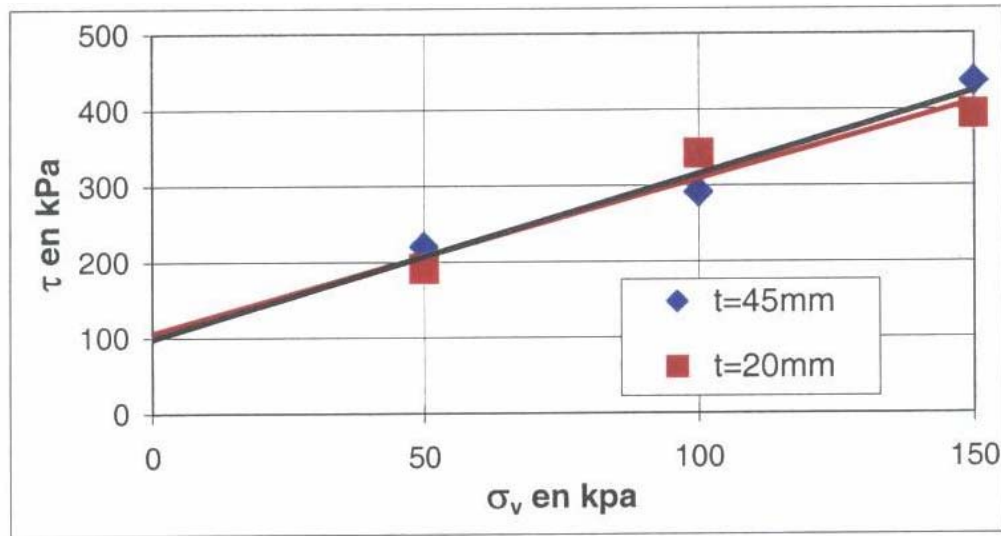


Figure I. 19: Influence de l'espacement de la boîte de 500 mm – Grave 0/60 mm de la Carrière de la Vallée Heureuse sur la droite de rupture de Mohr-Coulomb (Valle [2001]).

Afriani [2003] a étudié l'effet de l'espacement à l'aide de la grande boîte et de la petite boîte sur un matériau naturel 0/50 mm et un matériau de réemploi 0/25 mm (matériau naturel de Criquebeuf-sur-Seine écrêté à 25 mm). Elle a choisi un espacement en fonction du diamètre maximal des grains, à savoir : d_{\max} , $d_{\max}/2$ et $d_{\max}/4$.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (Tableau I. 3):

Boîte (mm)	Sol, d_{\max} (mm)	t (mm)	c (kPa)	ϕ (°)
500x500	Naturel, 0/50	12	56,4	38,5
	Naturel, 0/50	25	33,2	39,0
	Naturel, 0/50	50	29,9	38,8
250x250	Remblai, 0/25	6	31,6	42,5
	Remblai, 0/25	12	35,8	40,6
	Remblai, 0/25	25	33,6	37,7

Tableau I. 3: Influence de l'espacement entre les demi-boîtes sur les caractéristiques de rupture (d'après Afriani [2003])

On constate que, dans le cas de la grande boîte, une augmentation de l'espacement provoque une diminution de la cohésion, alors que la valeur de l'angle de frottement ϕ reste inchangée (Figure I. 20). Cependant, les résultats obtenus dans le cas de la petite boîte ne conduisent pas aux mêmes conclusions (Figure I. 21).

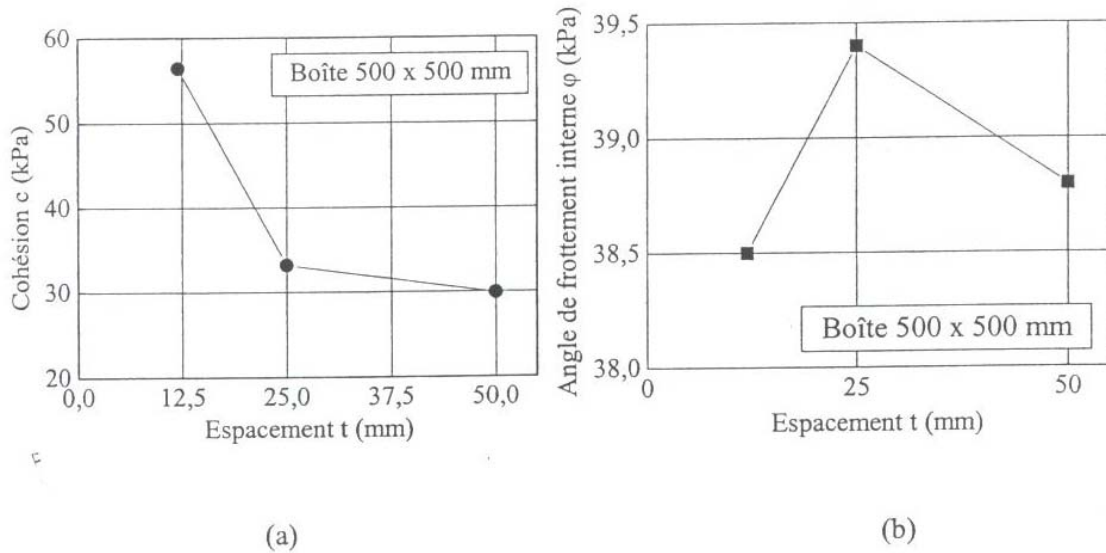


Figure I. 20: Résistance au cisaillement sur le matériau de réemploi, issu du remblai, écrêté à 25 mm : (a) cohésion en fonction de l'espacement ; (b) angle de frottement interne en fonction de l'espacement (Boîte 500 x 500 mm) (d'après Afriani [2003])

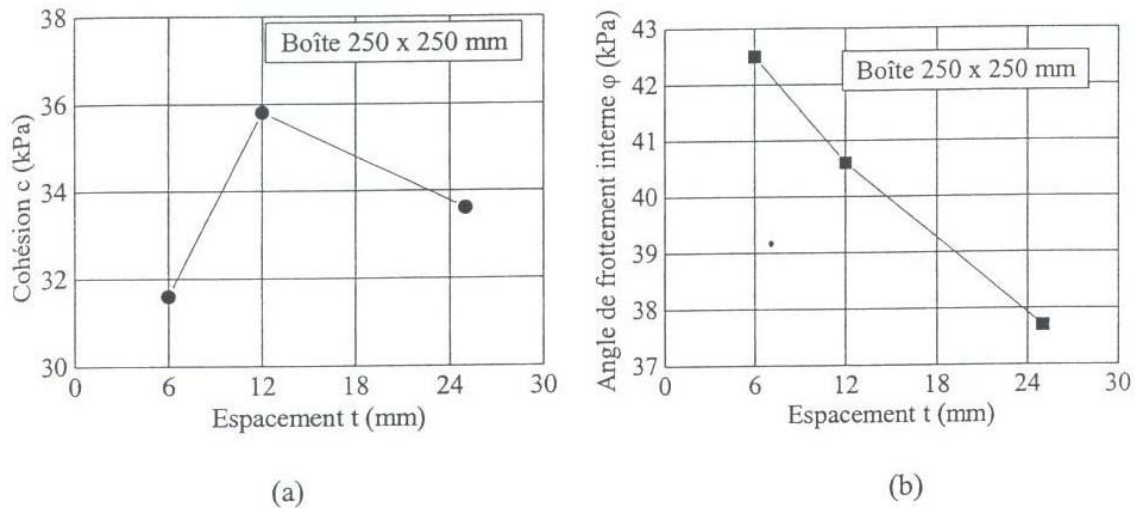


Figure I. 21: Résistance au cisaillement sur le matériau de réemploi, issu du remblai, écrêté à 25 mm : (a) cohésion en fonction de l'espacement ; (b) angle de frottement interne en fonction de l'espacement (Boîte 250 x 250 mm) (d'après Afriani [2003])

De plus, pour étudier l'effet de l'espacement entre les deux demi-boîtes, Afriani [2003] a réalisé une série d'essais à l'aide de l'appareil de cisaillement direct de dimensions 500 x 500 mm sur le sable de Fontainebleau. Les résultats de ces essais sont consignés dans le tableau suivant.

t (mm)	c (kPa)	ϕ (kPa)
1	32,1	34,8
6	22,4	37,0
12	16,4	36,4

Tableau I. 4: Résultats d'essais de cisaillement sur du sable de Fontainebleau pour différents espacements – Boîte 500 x 500 mm (d'après Afriani [2003]).

Comme pour les sols grossiers, les résultats obtenus montrent que l'espacement influence les caractéristiques mécaniques d'un sable homogène. L'augmentation de l'espacement diminue la valeur de la cohésion, et à partir de la Figure I. 22, on constate que :

- la cohésion passe de 32,1 à 22,4 pour une augmentation de l'espacement de 1 à 6 mm, la cohésion chute jusqu'à 16,4 kPa pour l'espacement de 12 mm ;
- l'angle de frottement interne varie de $34,8^\circ$ à 37° pour l'espacement allant de 1 à 6 mm. Au delà, il n'y a plus d'influence de l'espacement sur l'angle de frottement interne mesuré.

Si le sable est sec, il a une valeur de cohésion proche de zéro, car le matériau est pulvérulent. Les essais d'Afriani fournissent une cohésion différente de zéro et elle a justifié ce résultat par le fait que le sable est humide. D'autres auteurs, Bakir [1993] et Dubreucq [1999], présentent des résultats semblables sur un sable homogène et ils ne trouvent pas une cohésion nulle.

Les résultats présentés ci-dessus montrent que l'espacement joue un rôle important sur le comportement mécanique des sols, principalement sur la valeur de la cohésion mesurée.

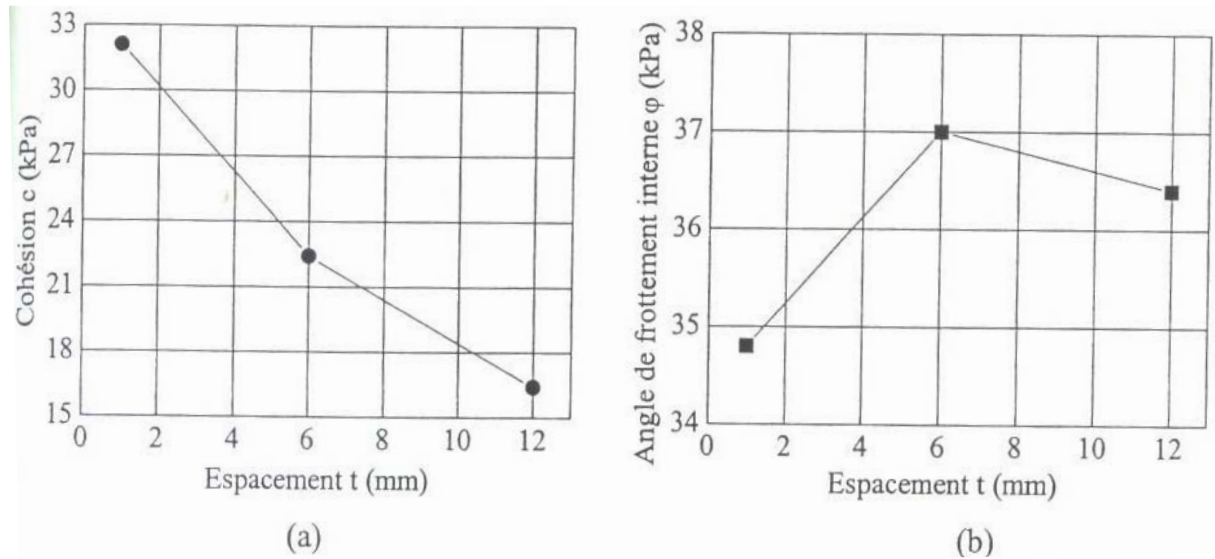


Figure I. 22: Résistance au cisaillement sur un sol fin : (a) cohésion en fonction de l'espacement ; (b) angle de frottement interne en fonction de l'espacement– Boîte 500 x 500 mm.

1.2.2 Influence des paramètres liés au sol

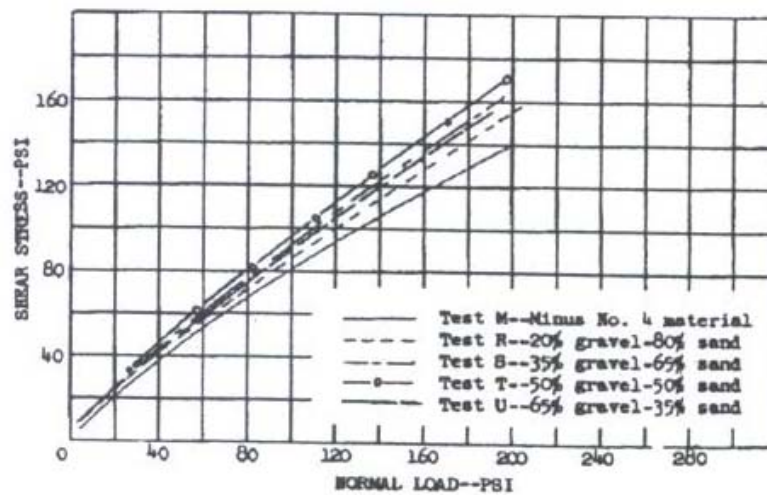
1.2.2.1 Influence de la proportion d'inclusion

La quantité des gros éléments présents joue un rôle très important sur le comportement mécanique des sols grossiers. Les travaux des Holtz et Gibbs [1956], Donagh et Torrey [1979], Zhang et Si [1982] et Pedro [2004] montrent que l'augmentation de la proportion d'inclusions provoque un accroissement de la résistance au cisaillement des sols grossiers. Plusieurs auteurs ont représentés ce paramètre par la teneur en graviers, qui est définie par le pourcentage en poids des particules plus grandes que 5 mm de la masse totale du sol.

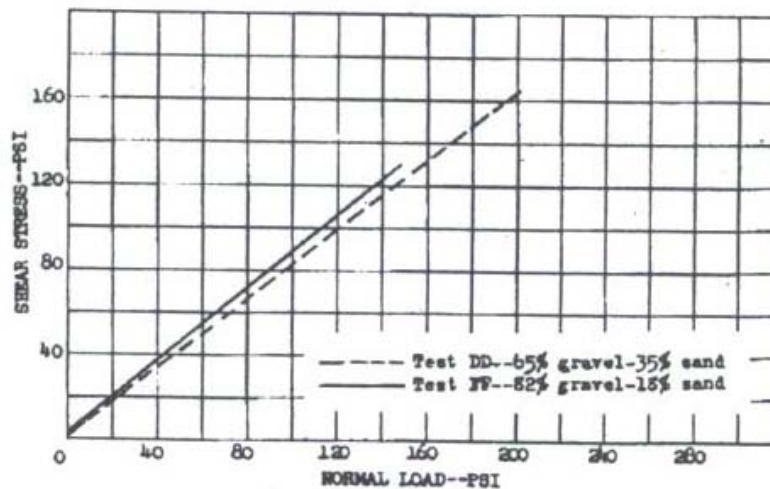
Pour illustrer les études portant sur l'effet de ce paramètre sur le comportement mécanique des sols grossiers, nous présentons les travaux de Holtz et Gibbs [1956]. Ces derniers ont effectué des essais triaxiaux en condition drainée sur des éprouvettes cylindriques de 228,6 mm de diamètre et de 571,5 mm de hauteur. La Figure I. 23a montre que la résistance au cisaillement est plus faible pour le matériau sans graviers et atteint une valeur maximale à 50%, pour diminuer à 65% de la teneur en graviers. Par contre, la Figure I. 23b montre que la résistance au cisaillement croît avec l'augmentation de la teneur en graviers quand elle passe de 65% à 82%.

La Figure I. 24 montre également un accroissement de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la teneur en graviers. Mais cette résistance commence à décroître quand la teneur en graviers dépasse une valeur de 65 % au 85 % (Zhang et Si [1982]).

L'augmentation de l'angle de frottement interne avec l'augmentation de la teneur en graviers a été observée également par Donagh et Torrey [1979] (Tableau I. 5). En effet, on voit que l'angle de frottement passe de 33.9° à 38.8° quand la quantité de graviers passe de 20% à 60% pour le matériau ayant un d_{\max} égal à 19 mm. Pour le matériau ayant un d_{\max} de 76 mm, l'angle de frottement passe de $34,6^\circ$ à $41,3^\circ$ quand la quantité passe de 20% à 60%.



(a)



(b)

Figure I. 23 : Effet de la fraction volumique des graviers : (a) matériau de rivière $d_{\max} = 19$ mm, $I_D = 70$ % ; (b) matériau de carrière $d_{\max} = 76$ mm, $I_D = 50$ % (Holtz et Gibbs [1956]).

Teneur en graviers (%)	d_{\max} (mm)	w (%)	e	E (MPa)	ϕ' (degrés)
20	19,0	11,0	0,280	24,4	33,9
40		10,7	0,283	10,3	32,4
60		12,0	0,319	21,7	38,8
20		10,0	0,253	81,6	32,9
40		9,4	0,249	36,0	36,3
60		10,6	0,283	83,5	38,3
20	76,0	9,9	0,263	17,2	35,6
40		10,0	0,267	28,1	39,0
60		9,9	0,263	13,7	40,3
20		8,7	0,232	257,7	34,6
40		7,9	0,211	68,2	36,7
60		8,1	0,215	57,0	41,3

Tableau I. 5 : Effet de la teneur en graviers. Résultats issus des études effectuées par Donagh et Torrey [1979]

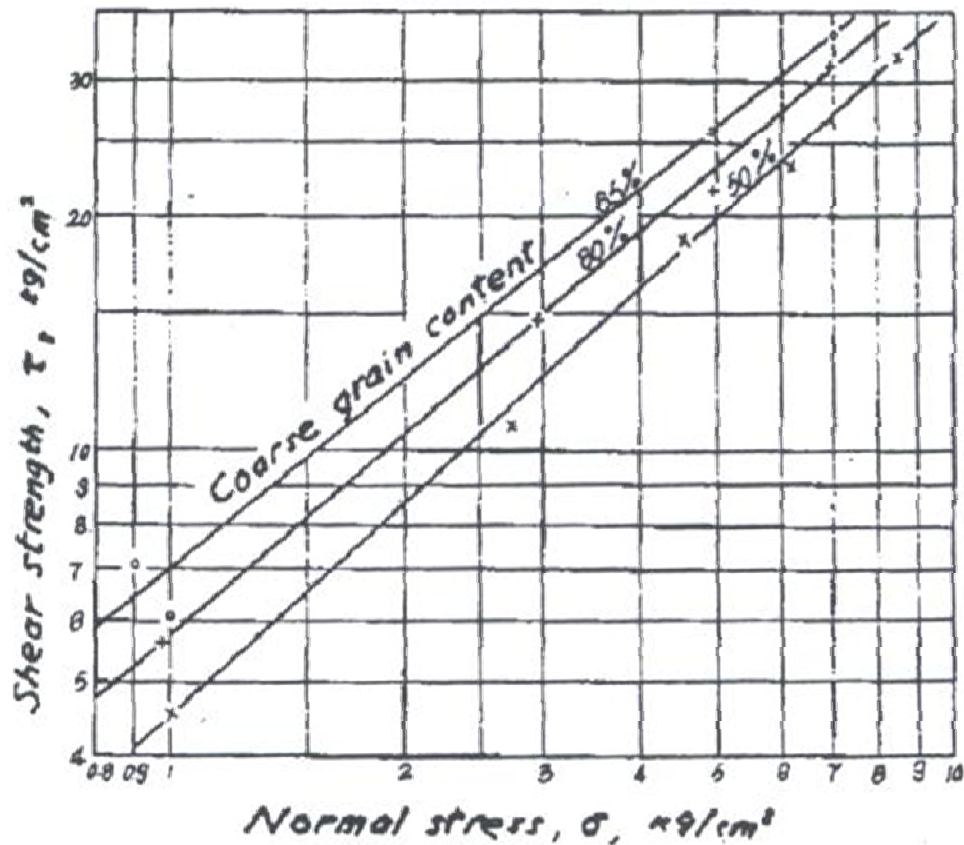


Figure I. 24 : Effet de la teneur en graviers sur la résistance au cisaillement (Zhang et Si [1982])

L'effet de la proportion d'inclusions a été étudié précisément par Pedro [2004]. Ce dernier a effectué des essais triaxiaux en condition drainée sur des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 100 mm et d'une hauteur de 200 mm. Le sol grossier étudié est constitué d'un mélange de sable de Fontainebleau et de différentes proportions de graviers anguleux 8/10 mm. La fraction volumique varie entre 0 et 35 % (la fraction volumique des inclusions (f_v) est le rapport du volume des inclusions sur le volume total).

Pedro [2004] a étudié l'influence de ce paramètre sur les caractéristiques obtenues en petites déformations et en grandes déformations. Les conclusions principales sont les suivantes :

- a) la valeur du module d'Young et du module de compression isotope augmentent avec l'augmentation de la proportion d'inclusions (Figure I. 25);
- b) la résistance au cisaillement du matériau augmente avec l'augmentation de la proportion d'inclusions (Figure I. 26).

Son interprétation de ces augmentations est que les graviers constituent des éléments rigides mélangés à la matrice, et qu'ils contribuent à la résistance globale de l'éprouvette au cisaillement.

On constate donc que tous les travaux portant sur l'effet de la fraction volumique des inclusions montrent une augmentation de la résistance au cisaillement des sols grossiers avec l'accroissement de la fraction volumique des inclusions.

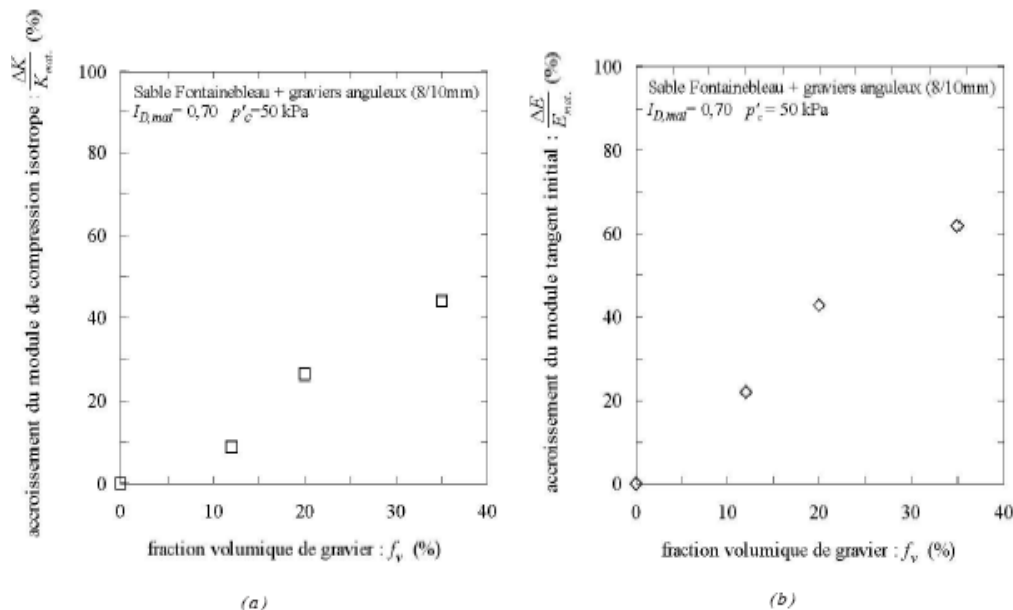


Figure I. 25 : Influence de la proportion de graviers : (a) sur l'accroissement du module de compression isotope ; (b) sur l'accroissement du module d'Young (Pedro [2004])

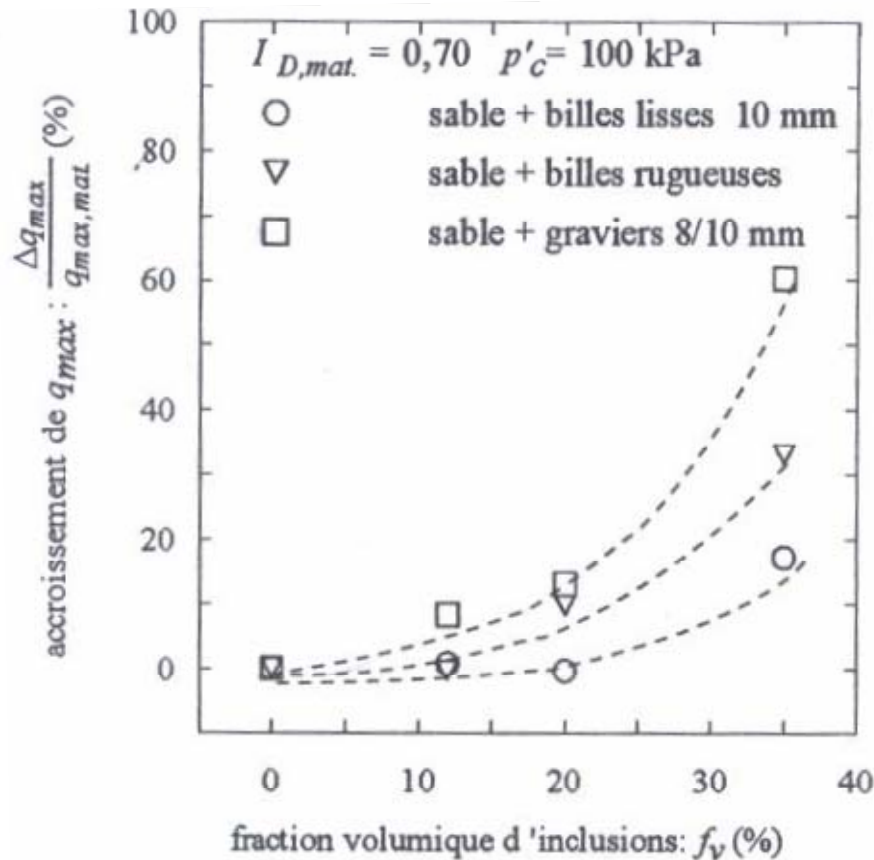


Figure I. 26 : Influence de la proportion volumique d'inclusions sur l'accroissement des caractéristiques de rupture du sol grossier à matrice (Pedro [2004])

I.2.2.2 Influence de la dimension des inclusions

L'étude de l'effet de la taille des inclusions sur les comportements observés consiste à réaliser des essais sur des sols grossiers analogues, en changeant la taille des inclusions.

Holtz et Gibbs [1956] ont étudié l'effet de la taille des inclusions sur le comportement mécanique d'un sol grossier reconstitué. Ils ont réalisé des mélanges contenant des proportions d'inclusions fixes (la proportion d'inclusions est représentée par le paramètre f_m qui correspond à la fraction massique d'inclusions), mais de tailles variables. L'ensemble des résultats est présenté dans le Tableau I. 6.

La Figure I. 27 synthétise les résultats. On observe que la taille des inclusions a une faible influence sur les caractéristiques à la rupture du matériau grossier.

Fraction massique d'inclusion (%)	20%			50%		
d_{\max} (mm)	19,1	38,1	76,2	19,1	38,1	76,2
φ (°)	37,2	37,9	38,3	40,0	40,0	41,3

Tableau I. 6: Influence de la taille des inclusions sur les caractéristiques de rupture d'un sol alluvionnaire (Holtz et Gibbs [1956]).

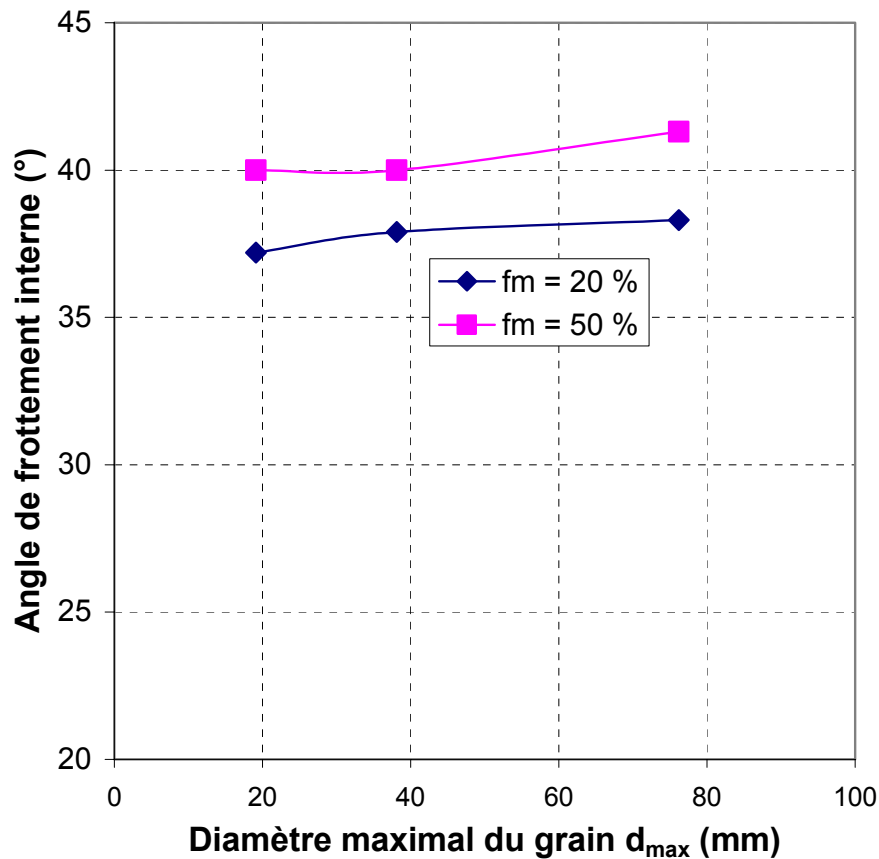


Figure I. 27: Effet de la taille des inclusions sur les caractéristiques de rupture d'un sol alluvionnaire (d'après Holtz et Gibbs [1956])

Donagh et Torrey [1979]) ont également étudié l'effet de la taille des inclusions sur le comportement de sols grossiers. Les essais ont été réalisés avec un appareil triaxial pour éprouvettes de 381 mm de diamètre sur un matériau naturel de d_{\max} égal à 76 mm et sur un matériau dont la fraction supérieure à d_{\max} (19mm) a été enlevée et substituée par un matériau de d_{\max} égal à 19 mm (enl/sub à 19 mm). Le Tableau I. 7 présente les résultats obtenus par Donagh et Torrey [1979]. La Figure I. 28 montre que, si on considère la différence de l'indice

des vides initial des essais, l'effet dû à la taille des grains est faible. En effet, on constate que les valeurs de ϕ' sont de 1° à 3° plus élevées pour le matériau naturel que pour le matériau substitué.

Enlèvement/substitution – $d_{\max} = 19 \text{ mm}$				Matériau naturel – $d_{\max} = 76 \text{ mm}$			
e-avant essai	e-après essai	$\phi' (^\circ)$	Cu	e-avant essai	e-après essai	$\phi' (^\circ)$	Cu
0,320	0,292	35,5	80	0,268	0,267	39,0	80
0,308	0,245	36,6	80	0,251	0,211	36,7	80

Tableau I. 7: Variation de ϕ' en fonction de l'indice des vides avant et après les essais ($D_0 = 381 \text{ mm}$), (Donagh et Torrey [1979])

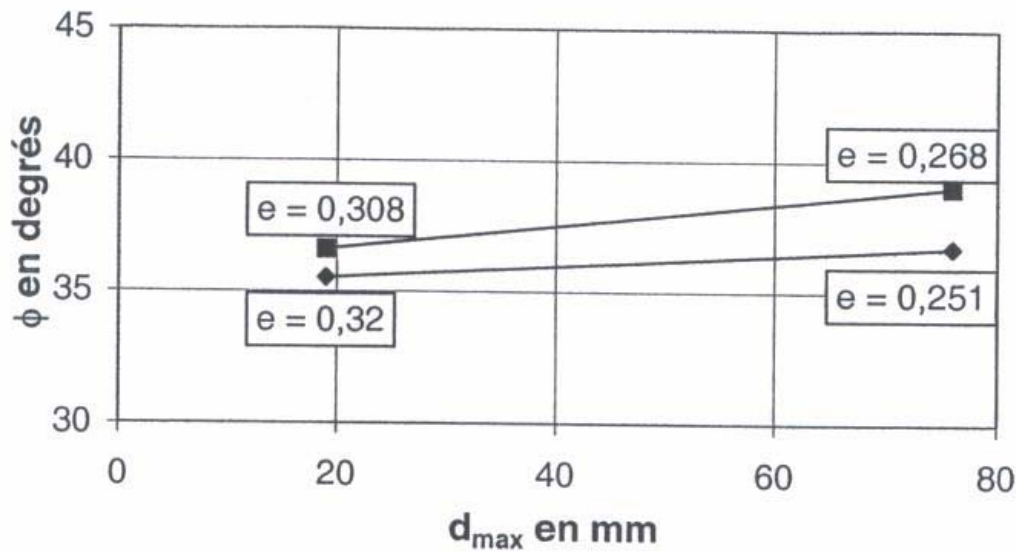


Figure I. 28 : Influence du d_{\max} sur l'angle de frottement interne (Donagh et Torrey [1979])

Le

Tableau I. 8 présente les essais réalisés par Valle [2001] pour étudier l'effet de la taille des grains de la grave de Criquebeuf-sur-Seine. Cet auteur a considéré les diamètres maximaux suivants : 6,3 ; 12,5 et 25 mm. Les essais ont été effectués à la grande boîte de cisaillement de dimension 500x500x300mm et à la petite boîte de cisaillement de dimension de 250x250x200mm. L'espacement retenu entre les demi-boîtes est de $d_{\max}/2$. L'ensemble des résultats est présenté dans le

Tableau I. 8 ci-après.

Boîte	Matériau	c (kPa)	ϕ (°)	ρ_d (Mg/m ³)	w (%)	TC (%)
Petite	écrêté à 6,3 mm	26,8	39,8	1,92	9,7	96,4
	écrêté à 12,5 mm	36,0	36,6	1,93	9,4	96,3
	écrêté à 25 mm	56,5	39,2	1,98	8,3	96,4
	enl/sub à 25 mm	7,5	50,6	1,99	7,6	96,1
Grande	écrêté à 25 mm	80	42,6	2,03	7,7	98,4

Tableau I. 8: Influence de d_{max} sur la résistance au cisaillement à la boîte d'une grave alluvionnaire (Valle [2001])

On observe une tendance à l'augmentation de la résistance au cisaillement du sol avec l'augmentation de la taille des grains. Il y a une augmentation de la cohésion, mais cependant l'angle de frottement varie peu (Figure I. 29). Ces résultats montrent que la taille de la boîte influence la résistance au cisaillement.

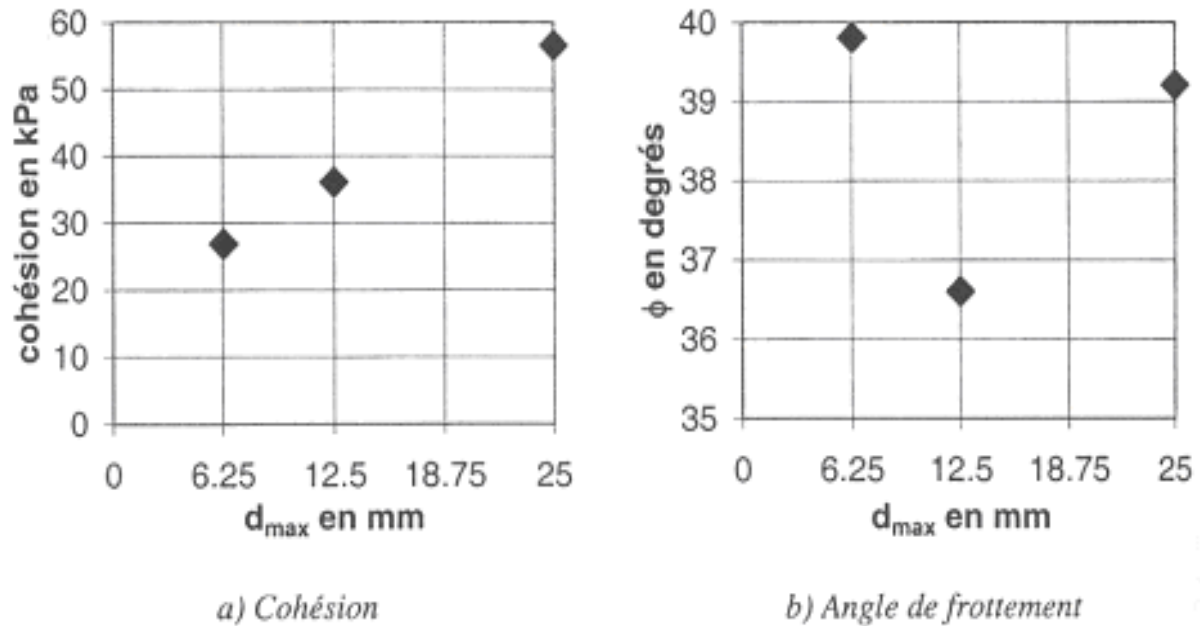


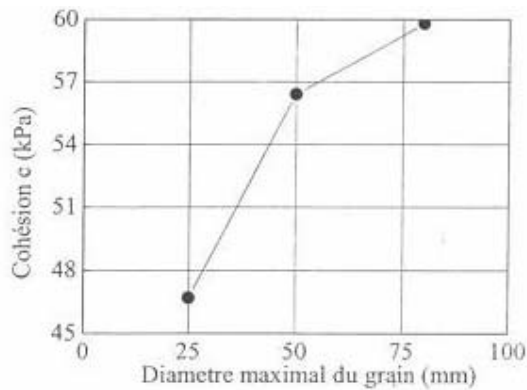
Figure I. 29: Effet du diamètre maximal d_{max} sur les paramètres de résistance du sol : (a) cohésion en fonction de d_{max} ; (b) angle de frottement interne en fonction de d_{max} (Valle [2001])

Cependant, Afriani [2003] a réalisé plusieurs séries d'essais relatifs à l'effet de la taille des grains à l'aide de grande boîte de cisaillement sur le matériau naturel de Criquebeuf-sur-Seine. Les diamètres maximaux retenus sont 25, 50 et 80mm avec un espacement entre les deux demi-boîtes $t = 12$ mm ($t > d_{max}/2$).

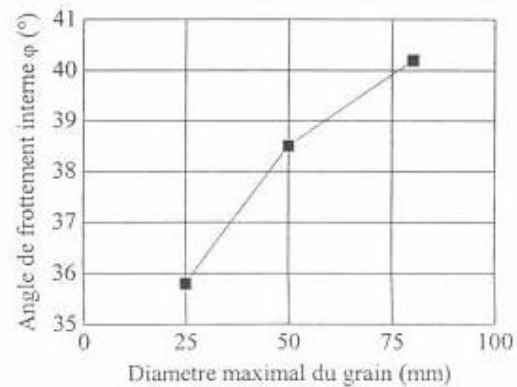
Afriani a constaté que les valeurs de la cohésion c et de l'angle de frottement ϕ augmentent avec le diamètre maximal des grains d'après le Tableau I. 9 et la Figure I. 30 présente les variations de c , ϕ et en fonction de d_{\max} .

d_{\max} (mm)	c (kPa)	ϕ (°)	L/d_{\max}
25	46,7	35,8	20
50	56,4	38,5	10
80	59,8	40,2	6,25

Tableau I. 9: Effet de la taille des grains d'une grave naturelle alluvionnaire : résultats des essais – Espacement t égal à 12 mm – boîte 500 x 500 mm (d'après Afriani [2003])



(a)



(b)

Figure I. 30 : Effet de la taille d'une grave naturelle alluvionnaire (d'après Afriani [2003]) : (a) cohésion en fonction de d_{\max} – Espacement $t = 12$ mm – boîte 500 x 500 mm ; (b) angle de frottement interne en fonction de d_{\max} – Espacement $t = 12$ mm – boîte 500 x 500 mm

L'étude de l'influence de la taille des graviers sur le comportement a été également réalisée par Pedro [2004] à l'aide de l'appareil triaxial de taille courante sur des mélanges contenant 20 et 35 % de graviers (matrice de sable de Fontainebleau). Celui-ci a utilisé des coupures granulométriques relativement serrées : 4/5 mm, 8/10mm et 16/20mm.

La Figure I. 31 montre que la taille des inclusions n'a pas d'influence sur l'augmentation de la résistance au cisaillement.

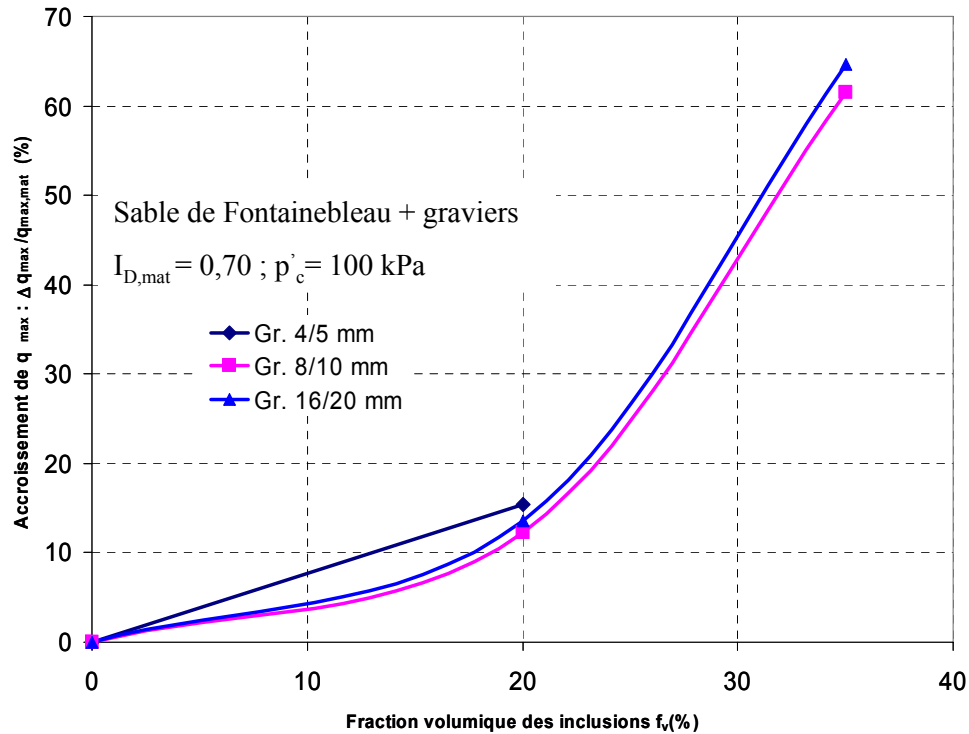


Figure I. 31: Influence de la taille des graviers sur l'augmentation de résistance au cisaillement de sols grossiers de référence, (d'après Pedro [2004])

1.2.2.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions

Pour étudier le comportement mécanique des sols grossiers à l'aide de dispositifs de laboratoire de taille classique, on doit, le plus souvent, écrêter ou substituer une partie du sol (les plus grosses particules : effet d'échelle §1.2.1.1). Donc, l'étude de l'effet de l'étalement est très importante.

En général, pour étudier ce paramètre, on réalise des essais en gardant la même fraction volumique, mais en changeant l'étalement granulométrique des inclusions. Donc ce paramètre est relié directement au coefficient d'uniformité (C_U) de la courbe granulométrique des sols grossiers.

Les travaux de Torrey et Donagh [1985] et Valle [1998] ont montré que l'angle de frottement et la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de d_{max} et de C_U .

La Figure I. 32 montre que la cohésion et l'angle de frottement augmentent avec l'augmentation de la taille des grains. Torrey et Donagh [1985] ont également conclu que

l'angle de frottement augmente avec l'augmentation du coefficient d'uniformité C_U (Figure I. 33).

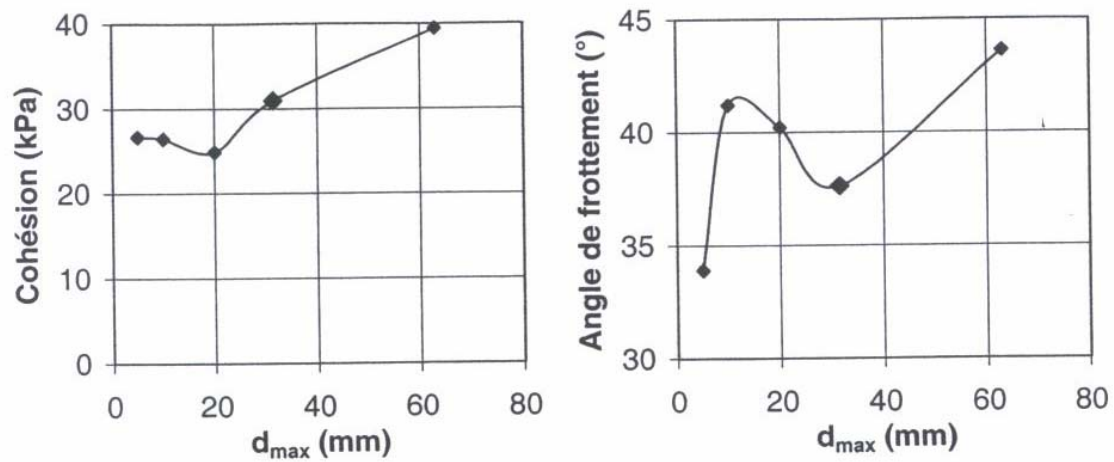


Figure I. 32 : Effet du diamètre maximal des grains sur la valeur de la cohésion et de l'angle de frottement interne à la boîte de cisaillement de 500 mm pour un coefficient d'uniformité C_U variable (Valle [1998]).

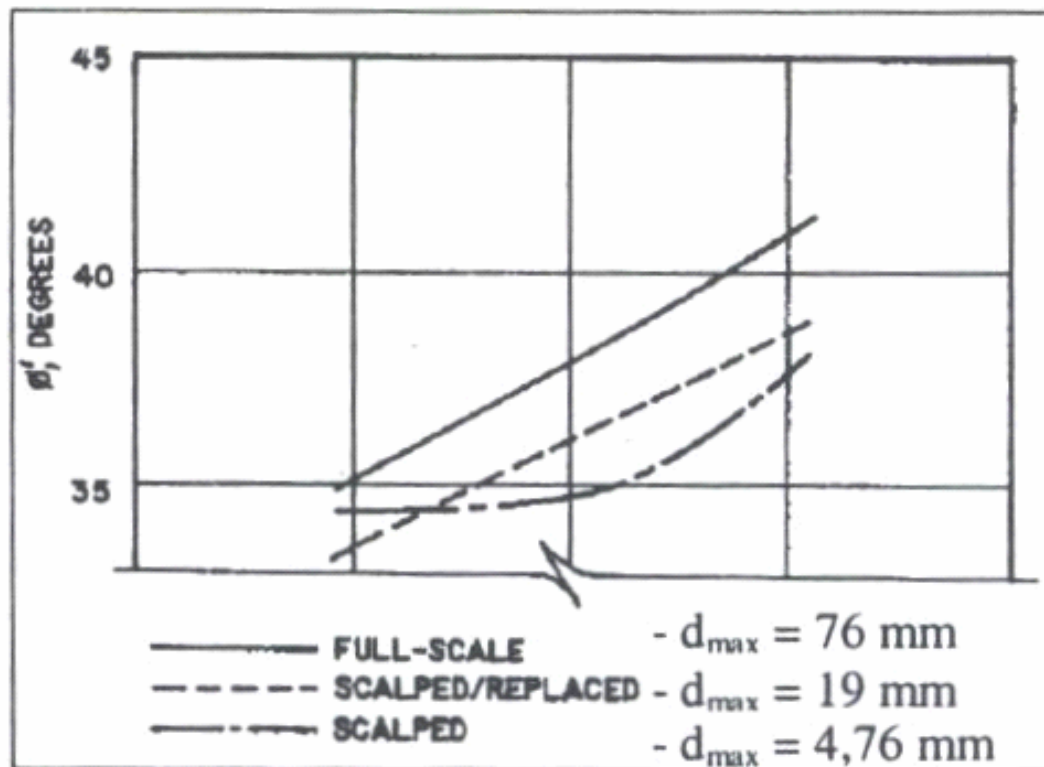


Figure I. 33: Effet de l'étalement granulométrique sur l'angle de frottement interne (Torrey et Donagh [1985])

Ces auteurs ont utilisé la technique d'écèlement dans leurs travaux. Cette technique permet de changer l'étalement granulométrique des sols grossiers, mais provoque une diminution de la fraction volumique des inclusions. Donc, il est difficile de conclure sur l'influence de ce paramètre seul, à partir de ces travaux.

1.2.2.4 Influence de la forme des inclusions

Pour mettre en évidence l'influence de la forme des inclusions, on compare les caractéristiques mécaniques des éprouvettes contenant des inclusions de différentes formes. En général, on distingue deux types de forme : forme arrondie et forme anguleuse. Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de la forme des inclusions sur le comportement des sols grossiers.

L'influence de la forme des inclusions sur la résistance au cisaillement des sols grossiers a été étudiée par Yagiz [2001] à la boîte de cisaillement (65 x 65 x 38 mm). La forme des graviers choisie est anguleuse ou arrondie avec une taille maximale des grains de 6,3 mm. La taille maximale des grains de sable est de 0,4 mm. Cet auteur a retenu un rapport de taille égal à 0,10.

La Figure I. 34 montre que la forme des graviers a peu d'influence sur l'angle de frottement interne.

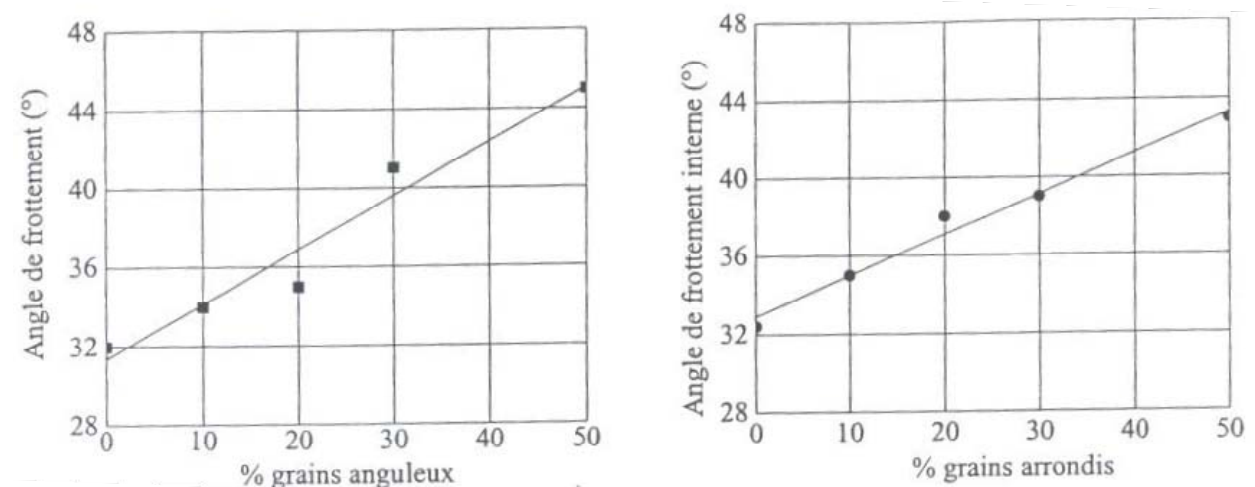


Figure I. 34 : Effet de la forme des inclusions sur l'angle de frottement (Yagiz [2001])

Afriani [2003] a réalisé des séries d'essais de cisaillement sur un matériau ayant subi une reconstitution par enlèvement et substitution à partir d'un matériau de base de sol naturel 0/50mm de Criquebeuf-sur-Seine (Figure I. 35). La substitution a été réalisée avec le matériau

concassé de Vignats 20/50mm (Figure I. 36). Ces séries d'essais ont été effectuées dans la grande boîte de cisaillement, de dimension 500x500x250mm, avec un espacement de 12 mm, le pourcentage de la substitution varie de 15% à 38%. On note que le matériau concassé de Vignats provient d'une roche massive quartzique.

La Figure I. 37 et le Tableau I. 10 montrent que la cohésion c et l'angle de frottement interne ϕ augmentent avec le pourcentage de matériau de Vignats et, par conséquent, avec la forme des inclusions. Cette augmentation avec le pourcentage de matériau de Vignats est très significative à partir de 30% de matériau concassé incorporé.

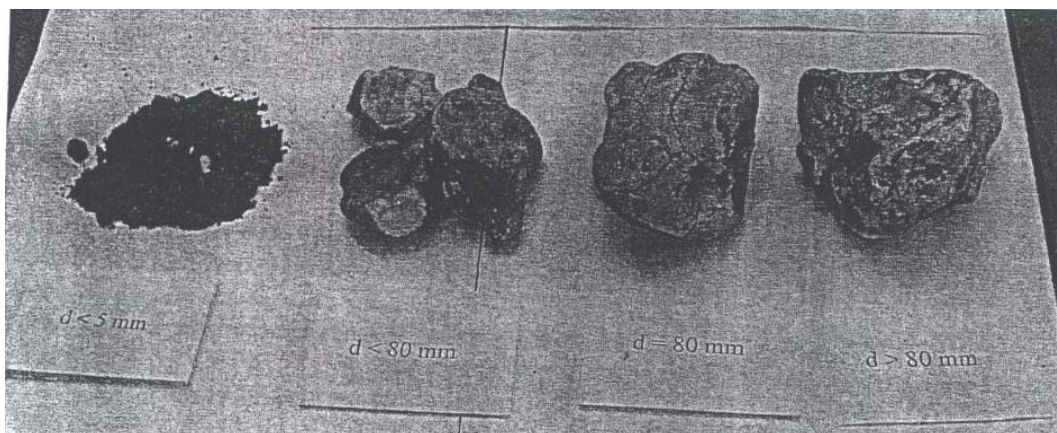


Figure I. 35 : Granulats sub-arrondis du matériau de Criquebeuf-sur-Seine (Afriani [2003])

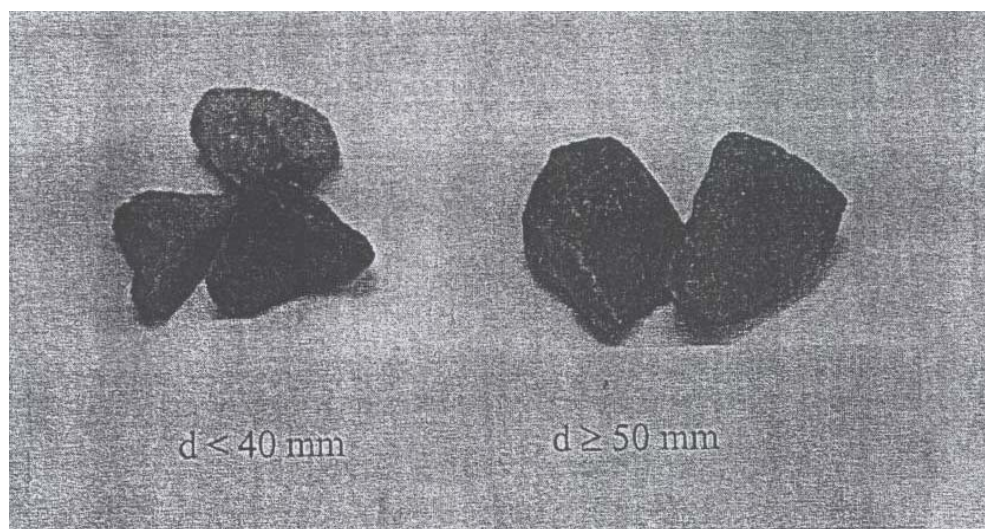


Figure I. 36 : Granulats anguleux du matériau de Vignats (Afriani [2003])

Composition du matériau	c (kPa)	ϕ (°)
100% de matériau naturel	33.2	39.0
85% de matériau naturel, 15%de matériau de Vignats	31.8	44.7
70% de matériau naturel, 30%de matériau de Vignats	33.7	39.2
62% de matériau naturel, 38%de matériau de Vignats	35.4	40.1

Tableau I. 10: Effet de la forme des inclusions d'une grave naturelle alluvionnaire : valeurs de c et ϕ (Afriani [2003]).

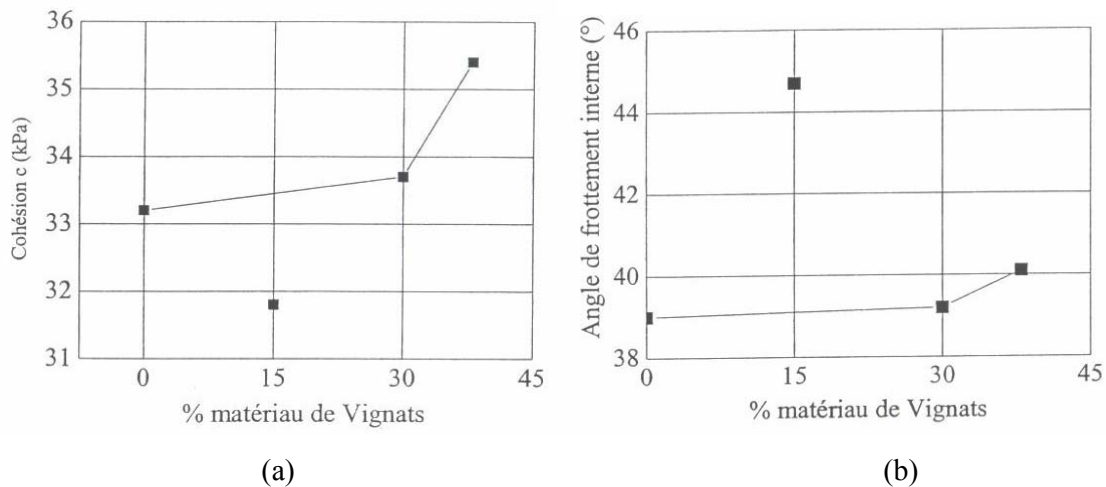


Figure I. 37 : Influence de la forme des inclusions. (a) Cohésion en fonction du pourcentage de matériau de Vignats ; (b) Angle de frottement en fonction du pourcentage de matériau de Vignats (Afriani [2003])

Pedro [2004] a étudié l'influence de ce paramètre en petites déformations et en grandes déformations. Il a fait des séries d'essais triaxiaux sur des éprouvettes contenant 20 % d'inclusions de forme sphérique (billes de verres (Figure I. 38)) et d'autres contenant des inclusions de forme anguleuse (graviers (Figure I. 39)).

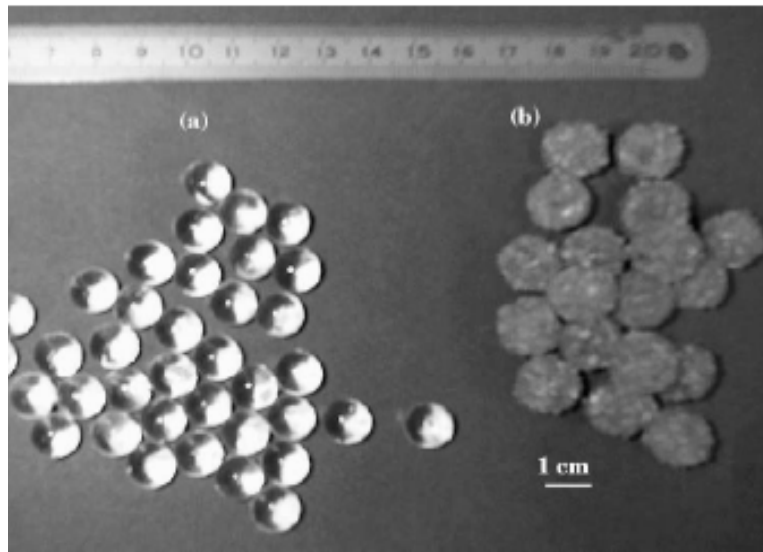


Figure I. 38 : Vue des inclusions sphériques : (a) état de surface lisse ; (b) état de surface rugueux (Pedro [2004])



Figure I. 39 : Vue des graviers (Pedro [2004])

La Figure I. 40 montre les courbes d'accroissement des modules de compression isotrope K et des modules d'Young E en fonction de la forme et de la rugosité des inclusions. Celles-ci sont confondues quelle que soit la forme des inclusions (graviers ou billes). Pedro a expliqué l'absence d'effet de forme par le fait que, en petite déformation, il n'y a pas de cisaillement des interfaces matrice/inclusions, seule la rigidité de celle-ci, ainsi que leur proportion, intervient dans l'effet de renfort observé.

En ce qui concerne la rupture, on observe que, dans le cas des graviers, l'effet de renfort est plus important que dans le cas des billes rugueuses (Figure I. 26).

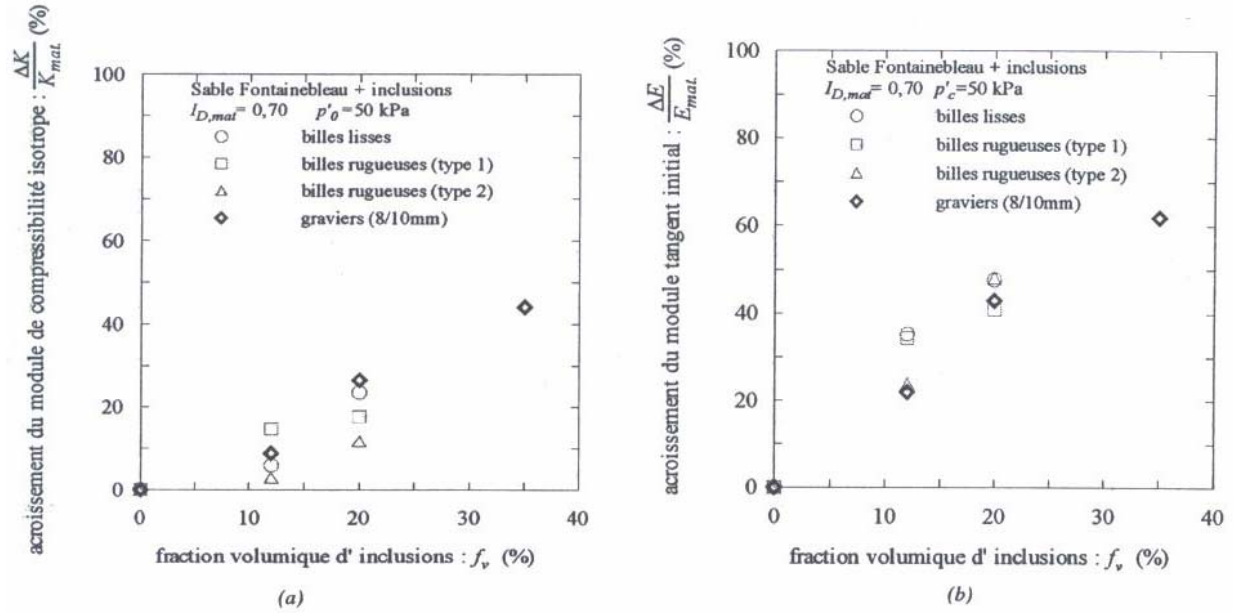


Figure I. 40 : Influence de la forme et de la rugosité des inclusions sur l'évolution des modules élastiques en fonction de la proportion d'inclusions : (a) cas du module de compression isotrope K ; (b) cas du module d'Young E (Pedro [2004]).

1.2.2.5 Influence de la rugosité des inclusions

Pour étudier l'effet de rugosité des inclusions, on compare le comportement d'un mélange à inclusions ayant une surface rugueuse, à celui d'un mélange à inclusions ayant une surface lisse.

L'effet de ce paramètre a été étudié par Pedro [2004]. Il a réalisé des essais sur des éprouvettes contenant des inclusions de forme identique mais ayant des rugosités différentes.

La surface des inclusions est rendue rugueuse en collant du sable d'Hostun (Figure I. 41).

La Figure I. 26, page 35, montre que l'état de surface joue un rôle important sur la résistance au cisaillement du matériau. En effet, dans le cas des billes rugueuses, l'effet de renfort est significatif par rapport aux billes lisses, car le coefficient de frottement d'interface sable - inclusion est plus grand pour les billes rugueuses. Par contre, dans le cas de l'élasticité, l'effet de rugosité n'est pas important (Figure I. 40). Pedro a expliqué ce résultat par le fait que, pour des chargements triaxiaux menés jusqu'à la rupture, les déformations déviatoriques dans la matrice et à l'interface entre la matrice et les inclusions, sont plus importantes que lorsqu'on est en élasticité. Par conséquent, il semble logique que l'influence de la rugosité soit plus facilement observable dans le cas à la rupture que dans le cas de l'élasticité, car, en élasticité, les déplacements sont faibles, et on ne mobilise pas le frottement matrice-inclusion.

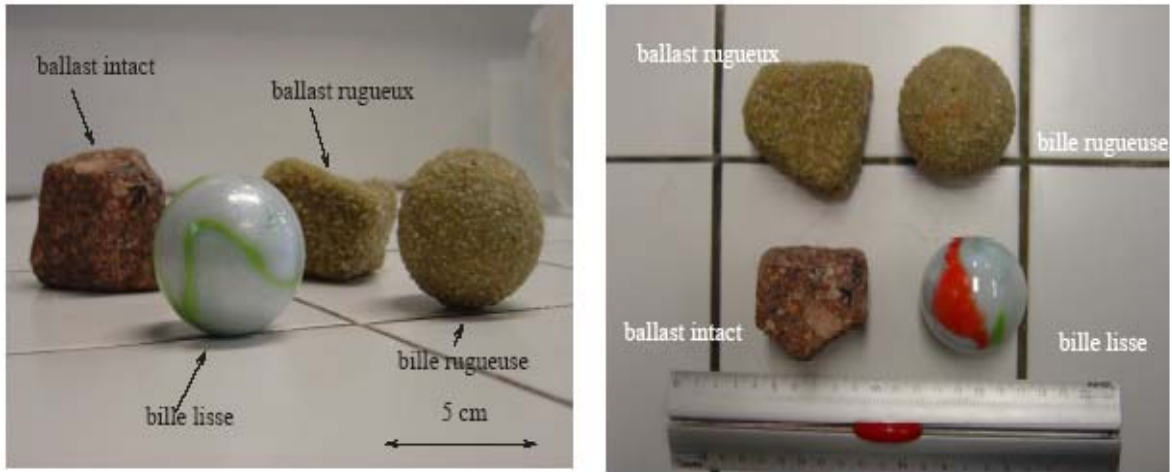


Figure I. 41 : Vues des différents types d'inclusions utilisées par Pedro [2004].

I.2.2.6 Influence de l'état de compacité de la matrice

Pedro [2004] a étudié l'influence de l'indice de densité initial de la matrice, en réalisant des essais pour une matrice dans un état lâche ($I_D = 0,33$) et dans un état dense ($I_D = 0,70$) en petites déformations.

Les résultats obtenus sont présentés dans les Tableau I. 11 et le Tableau I. 12:

No. essai	Type d'inclusion	f_v (%)	p'_c (kPa)	$I_{D,mat}$	K (MPa)	$\Delta K/K_{mat}$ (%)
iso248	gravier	0	50	0,33	23	0
iso244		20			30	23
iso096	gravier	0	50	0,70	34	0
iso230		20			34	26

Tableau I. 11: Caractéristiques des essais mettant en évidence l'influence de l'état de densité de la matrice sur le module de compression isotrope (d'après Pedro [2004])

No. essai	Type d'inclusion	f_v (%)	p'_c (kPa)	$I_{D,mat}$	E (MPa)	$\Delta E/E_{mat}$ (%)
T247	gravier	0	50	0.33	152	0
T243		20			227	49
T095	gravier	0	50	0.70	210	0
T229		20			306	46

Tableau I. 12: Caractéristiques des essais mettant en évidence l'influence de l'état de densité de la matrice sur le module d'Young E (d'après Pedro [2004])

On trouve que les accroissements de raideur du module de compression isotrope K et du module d'Young E sont indépendants de l'état de compacité initial de la matrice. Ces résultats montrent que l'augmentation des modules, causée par la présence des inclusions, est, de fait, indépendante de l'état de densité de la matrice.

I.3 Comparaison des résultats issus de la boîte de cisaillement direct et de l'appareil triaxial

Différents travaux ont été réalisés sur ce sujet. Nous citons le travail de Cruz et Nieble [1971] qui ont comparé les résultats issus de l'appareil triaxial \varnothing 100 mm avec deux boîtes de cisaillement (200 mm et 1000 mm de côté).

La Figure I. 42 et la Figure I. 43 montrent que l'essai à la boîte de cisaillement donne des valeurs de résistance au cisaillement plus grandes que celles obtenues à l'appareil triaxial.

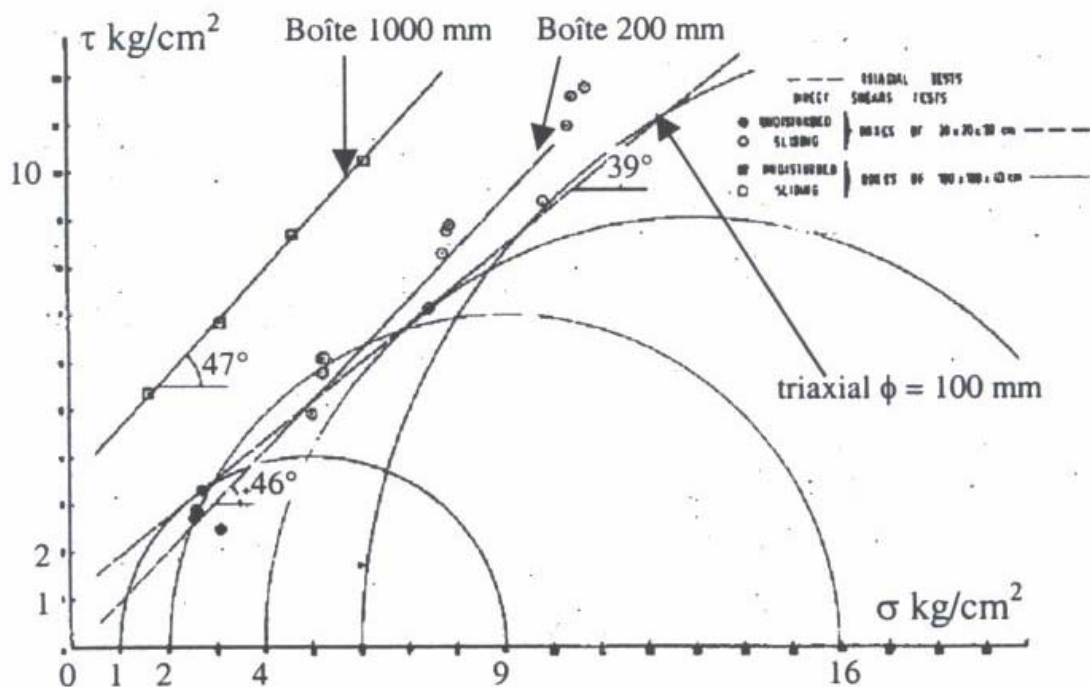


Figure I. 42 : Comparaison des résultats issus de la boîte de cisaillement direct avec ceux issus de l'appareil triaxial sur un ballast sain (Cruz et Nieble [1971])

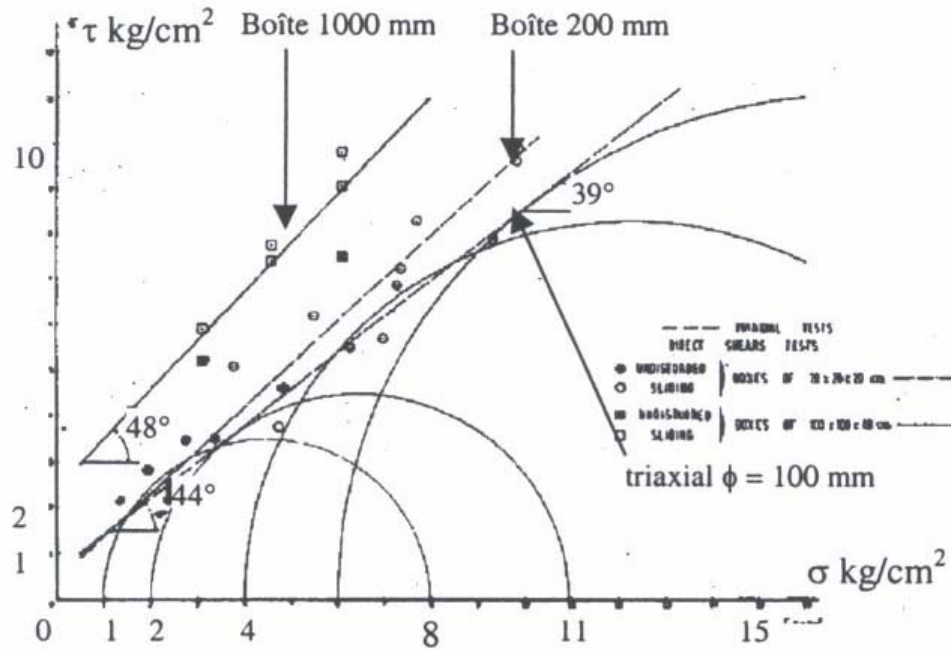
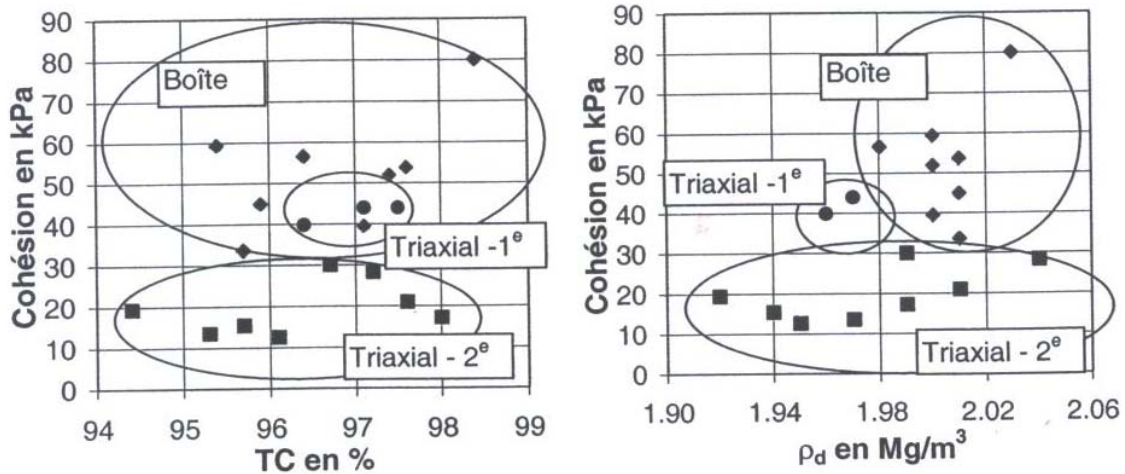


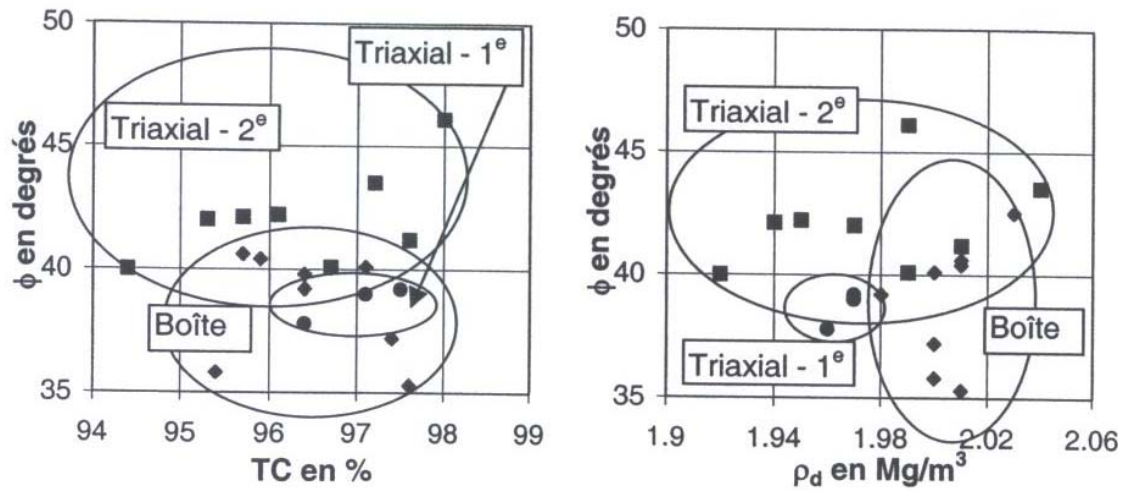
Figure I. 43 : Comparaison des résultats issus de la boîte avec ceux issus de l'appareil triaxial sur un ballast dense (Cruz et Nieble [1971])

La Figure I. 44 montre que les valeurs de la cohésion obtenues à partir des essais à la boîte de cisaillement direct sont plus élevées que celles obtenues à l'appareil triaxial (Valle [2001]). Pour l'angle de frottement, les valeurs sont proches.

Le Tableau I. 13 et la Figure I. 45 montrent les valeurs moyennes de la cohésion et de l'angle de frottement interne, obtenues par différents auteurs. On voit que l'angle de frottement interne est plus élevé de 2° et la cohésion plus grande de 50 kPa à la boîte par rapport au triaxial.



(a)



(b)

Figure I. 44 : Comparaison des résultats issus de la boîte avec ceux issus de l'appareil triaxial : (a) variation de la cohésion avec teneur de compactage TC et ρ_d pour un matériau de $d_{max} = 25$ mm ; (b) variation de l'angle de frottement avec teneur de compactage TC et ρ_d pour un matériau de $d_{max} = 25$ mm (Valle [2001]).

Valeurs	Boîte		Triaxial	
	c en kPa	ϕ en degrés	c en kPa	ϕ en degrés
Moyenne	74,8	43,2	21,7	41,3
Ecart type	54,0	5,9	35,6	4,2

Tableau I. 13 : Résultats issus des essais à la boîte et comparaison avec ceux issus de l'appareil triaxial. Valeur de la cohésion et de l'angle de frottement issus de la bibliographie (d'après Valle [2001])

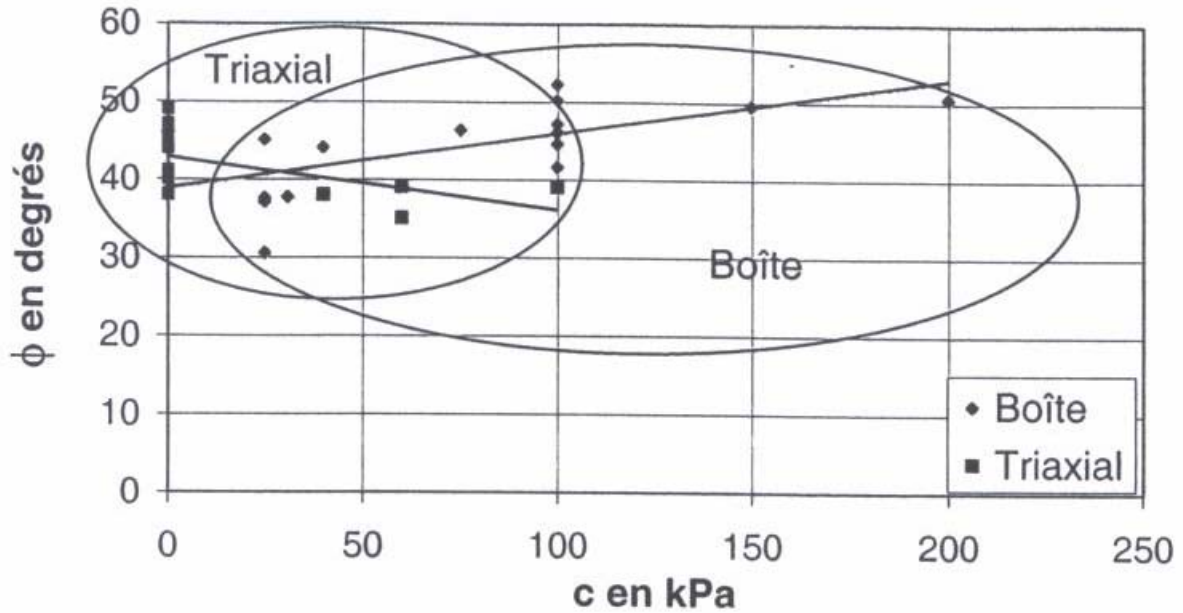


Figure 1. 45 : Comparaison des résultats issus de la boîte avec ceux issus de l'appareil triaxial. Valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement issues de la bibliographie (Valle [2001])

I.4 Méthodologie de caractérisation des sols grossiers à l'aide des appareils de taille classique au laboratoire

La caractérisation des sols grossiers est difficile à entreprendre à l'aide des appareils de laboratoire de taille classique à cause de la présence des gros éléments. On a donc recours à la méthode d'écrêtement ou de substitution. Mais quelle va être l'influence de ces méthodes sur les caractéristiques mécaniques obtenues ?

Pour répondre à cette question, il est très important d'étudier l'influence des paramètres de base sur le comportement mécanique des sols grossiers, comme l'influence de la fraction volumique, de la taille et de l'étalement granulométrique des inclusions.

Il existe une troisième méthode qui consiste à tester au laboratoire un "modèle réduit" du matériau, par similitude. Nous allons décrire les trois méthodes dans les paragraphes qui suivent et l'influence du type de méthode sur les résultats.

I.4.1 Méthode d'écèlement

La méthode d'écèlement consiste à réaliser des essais sur le sol duquel on a retiré toutes les inclusions dont la taille est supérieure au diamètre admissible ($d_{\text{admissible}}$). Par cette modification de la courbe granulométrique, la proportion volumique d'inclusions passe d'une valeur $f_{v0} = p$ à une valeur plus petite $f_{v1} = p'$ ($p' < p$) (Figure I. 46).

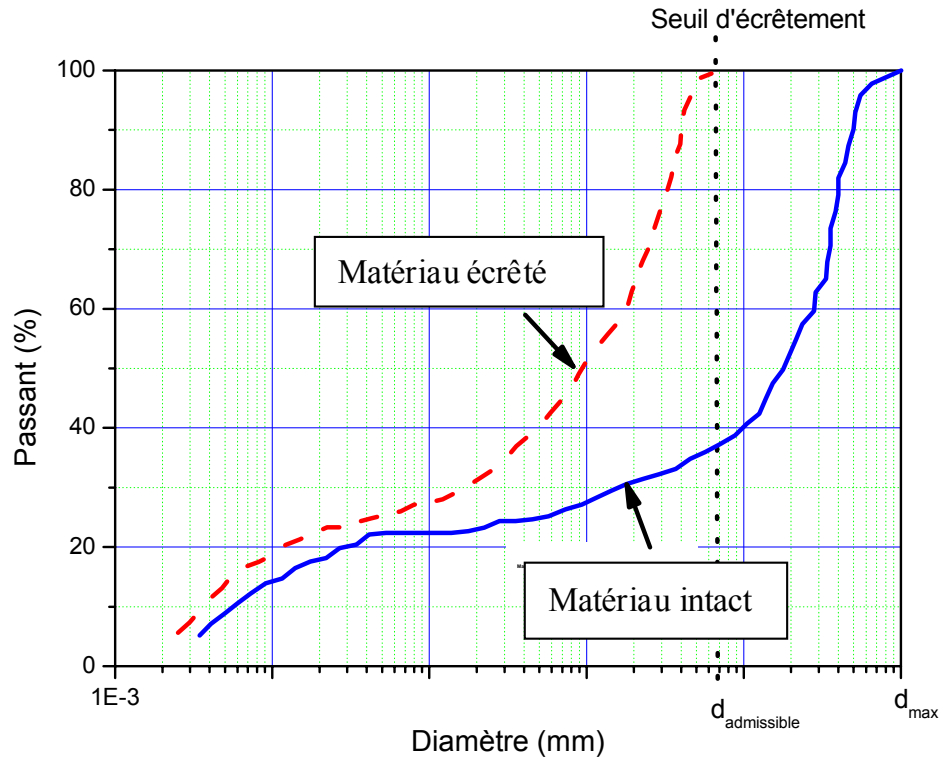


Figure I. 46: Illustration de la méthode d'écèlement (schéma de principe).

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'écèlement sur le comportement du sol grossier. En particulier, Pedro [2004] a étudié l'influence de l'écèlement sur le comportement d'un sol grossier modèle (sable de Fontainebleau + graviers) en réalisant une étude sur l'effet de la fraction volumique des inclusions. Il a constaté que la résistance au cisaillement à la rupture diminue avec la diminution de la fraction volumique des inclusions, donc l'écèlement des inclusions conduit à réduire les caractéristiques de rupture du sol grossier (Figure I. 47 et Figure I. 48).

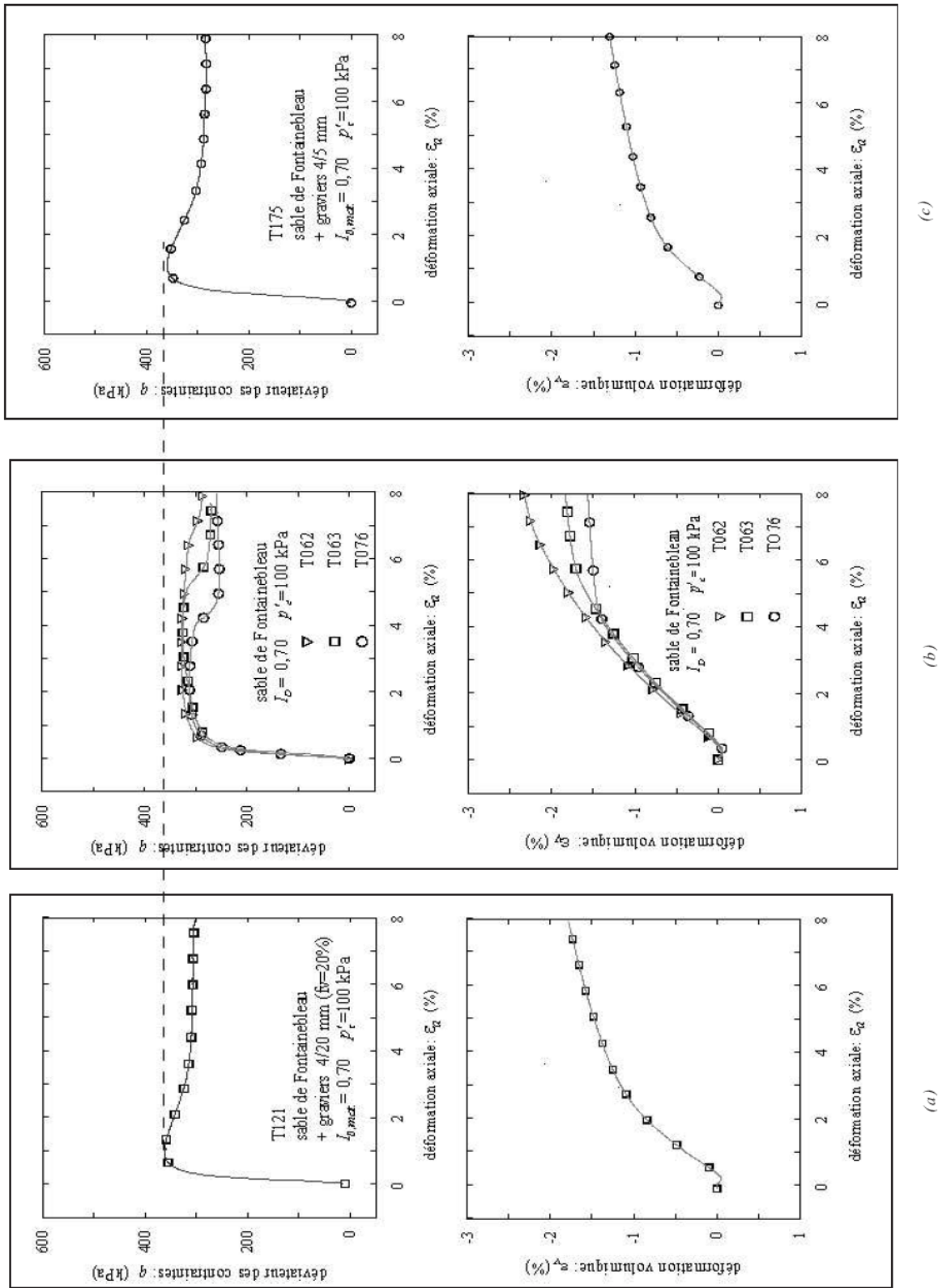


Figure I. 47: Influence du type de reconstitution granulométrique : (a) sol grossier complet (matrice + inclusions) ; (b) sol obtenu par écrêtement des inclusions ; (c) sol obtenu par substitution ; cas où $f_v = 20\%$, selon Pedro [2004].

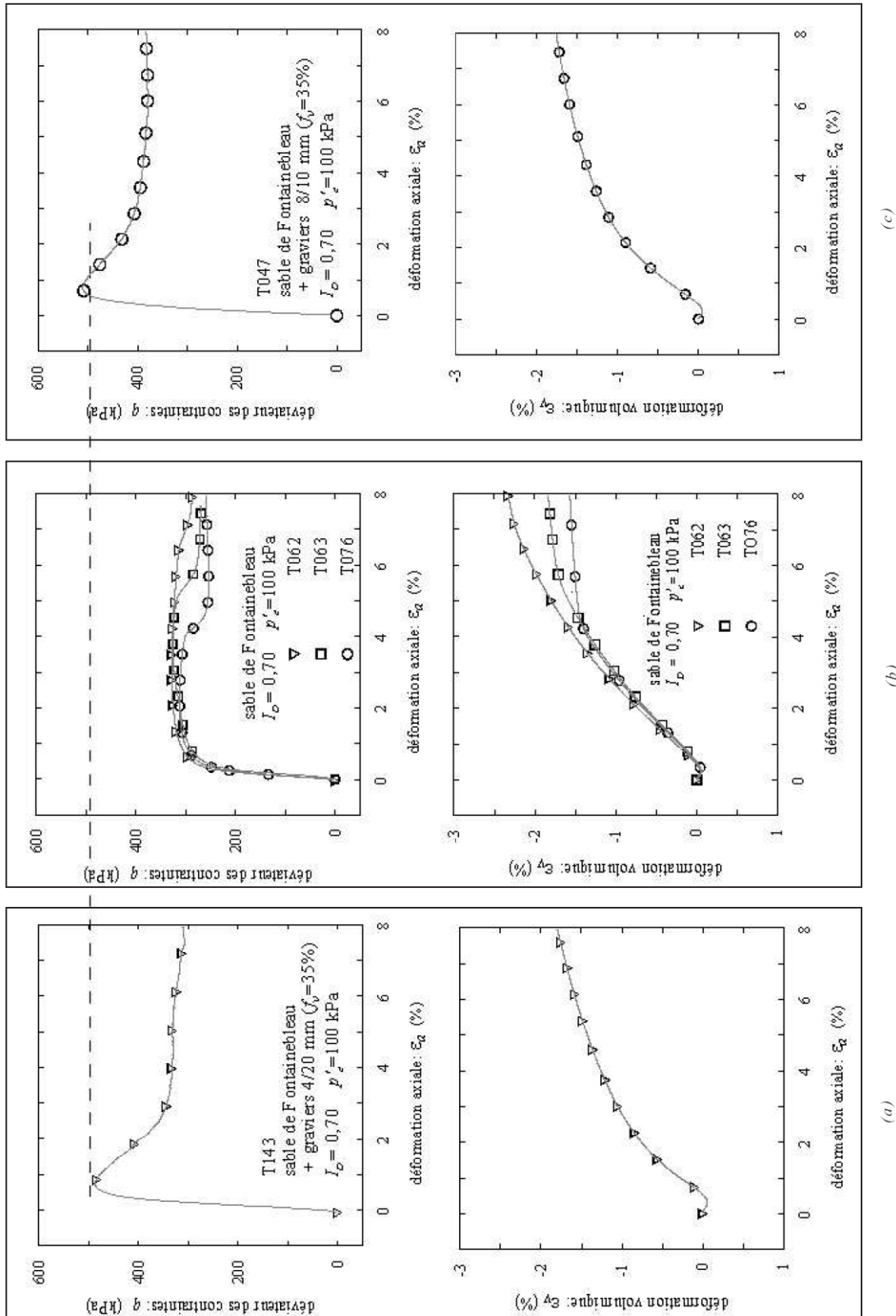


Figure I. 48 : Influence du type de reconstitution granulométrique : (a) sol grossier complet (matrice + inclusions) ; (b) sol obtenu par écrêtement des inclusions ; (c) sol obtenu par substitution ; cas où $f_v = 35\%$, selon Pedro [2004].

Valle [2001] a réalisé des essais sur des matériaux naturels écrêtés à 50 mm et 25 mm à l'aide d'une boîte de cisaillement de 500 mm de côté et de 300 mm de hauteur. Il a constaté que la valeur de l'angle de frottement interne est supérieure de 8° pour le matériau écrêté à 50 mm par rapport à celui écrêté à 25 mm (Tableau I. 14). Il observe également que la cohésion augmente avec le seuil d'écrêtement.

Ce résultat confirme que l'écrêtement diminue les caractéristiques mécaniques à la rupture d'un sol grossier.

Type de matériau	c (kPa)	ϕ (degrés)	ρ_d (Mg/m ³)	w (%)	TC (%)
Ecrêté à 25 mm	48,2	37,6	2,00	7,2	97,4
Ecrêté à 50 mm	65,2	45,6	2,09	6,3	97,1

Tableau I. 14 : Valeurs de c et ϕ à la rupture issues des essais à la boîte de 500 mm de côté d'après Valle [2001].

Les travaux de Fukuoka [1957], de Jain et Gupta [1974], de Donagh et Torrey [1979], de Siddiqi [1984], de Bolton et Lee [1993] et de Gotteland *et al.* [2000] confirment également une diminution des caractéristiques de rupture avec l'écrêtement.

Cependant, Dano [2001] a réalisé une série d'essais sur des matériaux écrêtés à 10, 6,3 et 3,15 mm (Figure I. 49) et il a observé que l'angle de frottement est plus élevé pour le matériau écrêté que pour le sol intact, (Tableau I. 15).

Les résultats obtenus par Dendani [1998] montrent également un accroissement de la résistance de pic lorsqu'on écrête les inclusions.

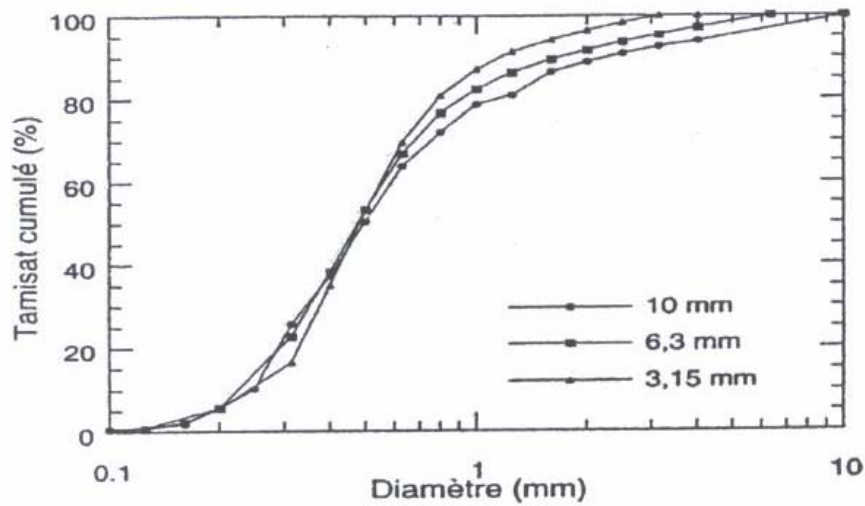


Figure I. 49: Courbe granulométrique d'un sol alluvionnaire écrêté à plusieurs niveaux, selon Dano [2001].

Sol	ϕ' (degrés)	M_c	M_p
Sol écrêté à 10 mm	36,6	1,27	1,49
Sol écrêté à 6,3 mm	38,1	1,29	1,55
Sol écrêté à 3,15 mm	38,7	1,32	1,58

Tableau I. 15 : Effet de l'écrêtement sur les paramètres de rupture ϕ' : angle de frottement interne, M_p : valeur du rapport q/p' à la rupture, M_c : valeur du rapport q/p' à l'état caractéristique, d'après Dano [2001].

Leslie [1963] a également étudié l'effet de l'écrêtement sur le comportement mécanique des sols grossiers. Il a effectué un écrêtement à deux niveaux de taille de grains (Figure I. 50) à l'aide d'un appareil triaxial de diamètre 304,8 mm et de 609,9 mm de hauteur. L'auteur observe que l'écrêtement n'a pas d'influence significative sur l'angle de frottement interne du matériau (Tableau I. 16).

Finalement, Post [1979] a également trouvé que l'écrêtement des inclusions ne modifie pas le comportement du sol grossier quand la proportion massique d'inclusions n'excède pas 10 % à 25 %. Feng et Vitton [1997] proposent une valeur seuil plus faible de 5 %.

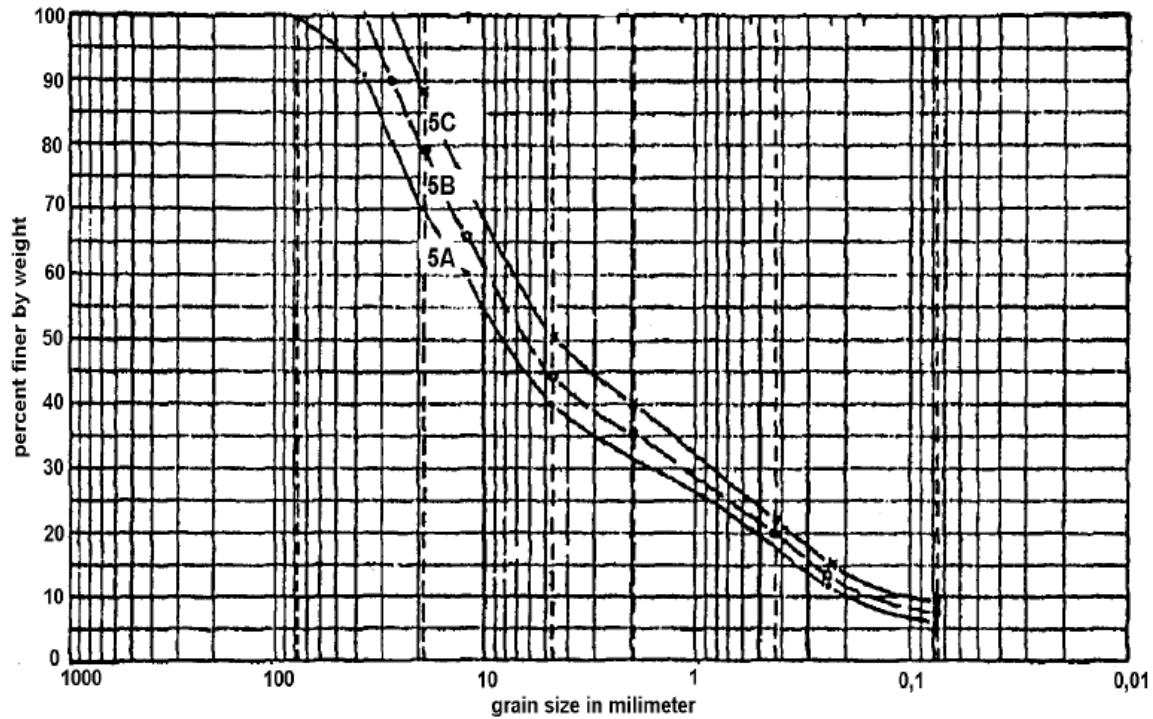


Figure I. 50 : Courbes granulométriques écrêtées du sol grossier étudié par Leslie [1963]. Courbes 5A : matériau non écrêté ($d_{max} = 76,2$ mm) ; Courbes 5B : matériau écrêté ($d_{max} = 38,1$ mm) et courbes 5C : matériau écrêté ($d_{max} = 25,4$ mm).

Matériau	d_{max} (mm)	Indice des vides	Angle de frottement ($^{\circ}$)
5A	76,2	0,233	41,0
5A	76,2	0,232	40,8
5B	38,1	0,234	41,4
5B	38,1	0,233	42,2
5C	25,4	0,266	40,3
5C	25,4	0,257	41,0

Tableau I. 16 : Effet de la fraction massique des inclusions sur l'angle de frottement d'un sol grossier d'après Leslie [1963].

A partir des résultats précédents, on arrive à des conclusions contradictoires. Ces différences peuvent s'expliquer par la variation, selon les études, des éléments suivants:

- les sols étudiés ;
- le seuil d'écrêtement ;
- le rapport de taille ;

- la façon de caractériser l'état initial de l'éprouvette du sol écrêté et l'éprouvette de sol intact.

Il est donc difficile de conclure sur l'influence positive ou négative de la méthode d'écrêtement. Cependant, les résultats des différents auteurs sur l'effet de l'écrêtement montrent que l'écrêtement simple modifie le comportement du sol.

I.4.2 Méthode de substitution

La méthode consiste à enlever les gros éléments et à les remplacer par une quantité égale, en masse, d'éléments plus petits (Figure I. 51).

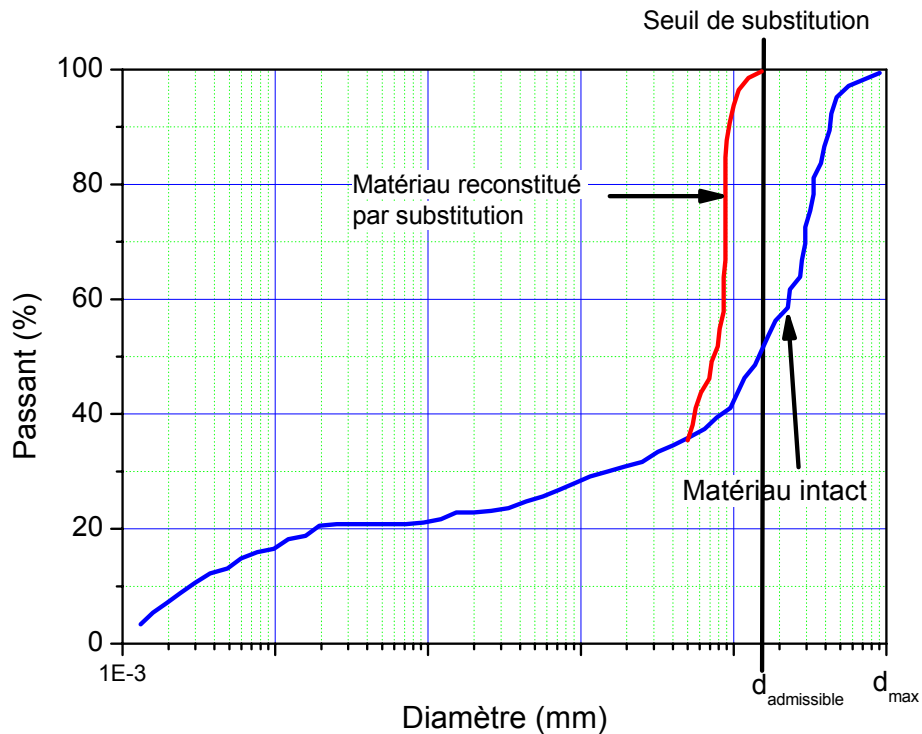


Figure I. 51 : Illustration de la méthode de substitution (schéma de principe).

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de cette méthode sur le comportement de différents sols grossiers. En particulier, Pedro [2004] a évoqué l'effet de la méthode de substitution sur le comportement mécanique d'un sol grossier. Il a montré que la substitution des inclusions de grande taille par des inclusions de taille plus petite, ne modifie pas le comportement du sol grossier. Cette étude a été réalisée sur un sol contenant 20% et 35% d'inclusions (Figure I. 47 et Figure I. 48, pages 53 et 54). Il a conclu que la méthode de substitution convient

parfaitement pour estimer les caractéristiques d'un sol grossier à partir des résultats d'essais de laboratoire, sur une éprouvette de taille réduite.

L'influence de la substitution sur le comportement mécanique des sols grossiers à l'aide de la boîte de cisaillement de 500 mm de côté et de 300 mm de hauteur a été étudiée par Valle [2001]. D'après le Tableau I. 17, on constate que l'angle de frottement et la cohésion sont plus élevés pour un sol substitué à 50 mm que pour le sol substitué à 25 mm.

Dendani [1998] a réalisé des essais sur un sol constitué de débris rocheux de grès à l'aide d'un appareil triaxial sous une contrainte moyenne constante. Il a constaté une influence de la méthode de substitution pour les fortes contraintes de confinement (600 kPa).

Type de matériau	c (kPa)	ϕ (degrés)	ρ_d (Mg/m ³)	w (%)	TC (%)
Enlèvement/substitution à 25 mm	45,9	39,0	2,01	7,5	95,6
Enlèvement/substitution à 50 mm	59,8	43,2	2,07	6,3	95,3

Tableau I. 17: Valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion issues des essais à la boîte de cisaillement de 500 mm de côté (d'après Valle [2001]).

Donagh et Torrey [1979] ont étudié l'effet de la substitution sur le comportement des sols grossiers sous chargement triaxial monotone non drainé et ils ont trouvé que, lorsque la proportion d'inclusions est inférieure à 40%, les résistances sont plus faibles pour le matériau modifié que pour le sol intact, et inversement si la proportion d'inclusions est de 60 %.

Les différents résultats trouvés dans la bibliographie sont contradictoires. Il est donc difficile de conclure quant à la validité de cette méthode.

I.4.3 Méthode de reconstitution granulométrique par similitude

Cette méthode consiste à tester en laboratoire un matériau de composition granulométrique modèle. Il s'agit de tester un sol qui est constitué des éléments dont la taille maximale est inférieure ou égale au diamètre admissible et dont la courbe granulométrique est une similitude de celle du sol réel (Figure I. 52).

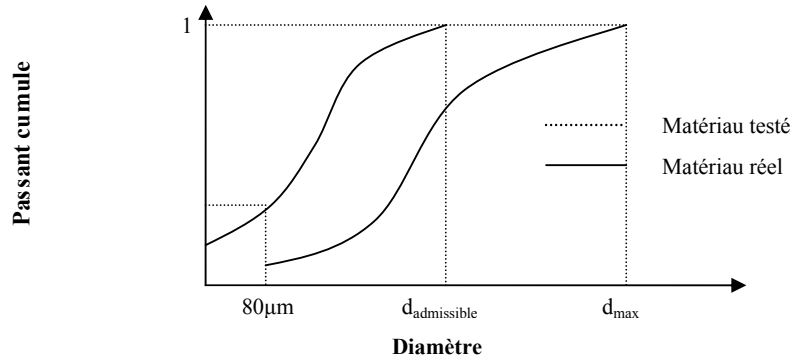


Figure I. 52: Illustration de la méthode de reconstitution granulométrique par similitude

Cette méthode met en relation la taille des particules du matériau d'origine avec celle de l'échantillon défini par un rapport constant M_r :

$$M_r = \frac{d_{\max}^r}{d_{\max}^m} = A \quad (1.1)$$

Le matériau reconstitué présente le même étalement granulométrique que celui d'origine.

Pour appliquer cette méthode il faut respecter plusieurs conditions, selon Lowe [1964] et Anagnosti [1982], qui sont :

- 1) Respect d'une similitude de la distribution granulométrique (courbes granulométriques parallèles) : Pour obtenir une similitude sur la distribution granulométrique, il faut que les diamètres des grains du sol grossier soient diminués d'un rapport de similitude constant M_r ;

$$M_r = \frac{d_{\max}^r}{d_{\max}^m} = \frac{d_{75}^r}{d_{75}^m} = \frac{d_{50}^r}{d_{50}^m} = \frac{d_i^r}{d_i^m} = A \quad (1.2)$$

avec

d^r : dimension des grains du matériau réel.

d^m : dimension des grains du matériau modèle.

d_i : diamètre nominal d'un grain.

- 2) Respect d'une similitude sur l'arrangement initial des grains du sol. Pour respecter ce point, il suffit de vérifier que l'indice des vides du sol modèle est égal à celui du sol réel. Selon Anagnosti [1982], si l'effet de compactage par unité de volume reste inchangé et que la similitude sur la distribution granulométrique est respectée, cette condition l'est aussi ;
- 3) Respect d'une similitude sur le volume représentatif du sol ;
- 4) Respect d'une condition de similitude sur la qualité du grain c'est-à-dire sa déformabilité, sa résistance à la cassure, sa résistance au déplacement relatif grain sur grain qui dépend elle-même de la rugosité de surface, de la forme et du mode d'assemblage des grains. Le respect de cette condition n'est pas facile, en particulier lorsque le sol grossier a une granulométrie très étalée.

Leslie [1963] a trouvé qu'il n'y a aucune différence entre l'angle de frottement interne du sol modèle et celui du sol réel. Par contre Marchi *et al.* [1972] et Thiers et Donovan [1981], ont trouvé que le matériau modèle aurait un angle de frottement plus élevé que le sol réel.

I.5 Conclusions

Les sols grossiers peuvent être caractérisés à l'aide d'essais *in situ* ou d'essais en laboratoire. La caractérisation *in situ* des sols grossiers pose beaucoup de difficultés (par exemple, les procédures d'essais sont longues, coûteuses, l'interprétation des essais est un problème de mécanique aux conditions aux limites mal définies). Cependant, la caractérisation des sols grossiers au laboratoire nécessite de tester un volume de sol suffisamment grand pour qu'il soit représentatif du sol *in situ*. On a observé que, pour l'essai triaxial, le volume est représentatif du sol *in situ* si le rapport de taille (ϕ/d_{\max}) est supérieur à 5 ou 6. Par ailleurs, pour l'essai à la boîte de cisaillement, il faut un rapport de taille (L/d_{\max}) supérieur à 10. En général, l'utilisation des dispositifs expérimentaux au laboratoire de grandes dimensions permet d'assurer un volume de sol représentatif, mais le développement de dispositifs de

grande taille est cependant limité par les coûts que ces appareillages engendrent. Il est donc très important de pouvoir caractériser les sols grossiers au laboratoire à l'aide de dispositifs de taille classique.

Dans le cas où le rapport de taille n'est pas assuré, on a besoin de reconstituer le sol en enlevant ou en substituant les gros éléments pour caractériser les sols grossiers à l'aide des dispositifs de taille classique. Il est donc important de connaître l'influence des paramètres fondamentaux liés au mode de reconstitution sur les caractéristiques mécaniques des sols grossiers. Ces paramètres sont :

- la fraction volumique des inclusions f_v ;
- la taille des inclusions;
- l'étalement granulométrique des inclusions.

La méthode d'écèlement consiste à enlever les gros éléments du sol, donc la proportion de ces éléments diminue. Il est donc important de comprendre l'effet de la proportion d'inclusions sur le comportement des sols grossiers. Les travaux portant sur ce sujet ont montré que, lorsque la proportion d'inclusions diminue, la résistance au cisaillement et les propriétés élastiques du sol diminuent également.

La méthode de substitution consiste à remplacer les inclusions les plus grosses par des inclusions plus petites. Il est donc important de connaître l'effet de la taille et de l'étalement granulométrique des inclusions sur le comportement mécanique des sols grossiers. Les différents résultats menés sur l'effet de ces deux paramètres divergent.

Enfin la méthode de reconstitution granulométrique par similitude consiste à tester au laboratoire un sol qui est constitué d'éléments dont la taille maximale d_{max} est inférieure ou égale au diamètre admissible et dont la composition granulométrique est une similitude de celle du sol réel, donc il est intéressant de comprendre l'effet de la nature de la matrice qui peut être argileuse, limoneuse ou sableuse et l'effet de la morphologie des inclusions qui peuvent être arrondies ou anguleuse. Il existe peu de travaux concernant l'effet de ces deux paramètres sur les caractéristiques de rupture ou d'élasticité et les résultats sont divergents.

Finalement, les résultats des diverses études menées sur l'application de ces méthodes de reconstitution sont différents. Cette divergence des résultats, résulte, pour une bonne part, de la variation de la composition des matériaux naturels utilisés d'une étude à l'autre et à l'absence d'une procédure commune pour l'utilisation de ces méthodes (le choix des éléments

qui constituent les inclusions ainsi que le choix de l'état de densité des éprouvettes de sol reconstitué varient selon les auteurs).

Cependant, l'approche développée par Pedro [2004] sur l'étude de sols grossiers de référence semble la plus appropriée pour réaliser une étude expérimentale complète. Celui-ci a cependant été limité dans l'étude de l'effet de taille et de l'étalement granulométrique, car il a utilisé un triaxial de 100 mm de diamètre.

Le travail s'inscrit dans la continuité de celui de Pedro [2004], mais en utilisant des dispositifs de grandes dimensions (triaxial Ø 300 mm et boîte de cisaillement (300 x 300 x 180 mm)), pour pouvoir complexifier le sol grossier utilisé (taille des particules, étalement, ...), en vue de proposer une méthodologie de caractérisation de ces sols à partir des résultats obtenus sur les dispositifs de taille courante.

CHAPITRE II : PRESENTATION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET DES MATERIAUX UTILISES

Dans ce chapitre, nous allons présenter les dispositifs expérimentaux utilisés pour caractériser le comportement mécanique des éprouvettes de sol grossier.

La première partie présente les dispositifs triaxiaux qui permettent de tester des éprouvettes de grandes dimensions ($\varnothing = 300$ mm, $h = 600$ mm) et des éprouvettes de taille moyenne ($\varnothing = 100$ mm, $h = 200$ mm). Ensuite nous présentons la boîte de cisaillement de grandes dimensions (300 mm de côté et de 180 mm de hauteur).

Dans une seconde partie, nous allons présenter les matériaux utilisés (sols de référence) et la méthode de caractérisation et de fabrication d'une éprouvette de sol grossier.

Enfin, la dernière partie concerne les essais de répétabilité afin de valider les dispositifs expérimentaux utilisés.

II. 1 Dispositifs triaxiaux

Ce paragraphe est consacré à la présentation des appareils triaxiaux utilisés pour caractériser le comportement mécanique des éprouvettes de sol, ainsi que la procédure expérimentale utilisée. On trouvera plus de détails dans le mémoire de Pedro (2004) qui a utilisé ces deux dispositifs, et en particulier l'appareil triaxial $\varnothing 100$ mm.

II.1.1 Présentation de l'appareil triaxial $\varnothing 300$ mm

Pour étudier le comportement mécanique des sols grossiers, nous avons utilisé l'appareil triaxial de grandes dimensions, qui permet de solliciter des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 300 mm et d'une hauteur de 600 mm. Ces éprouvettes peuvent être testées sous un chemin de chargement triaxial monotone ou cyclique. La Figure II. 1 présente un schéma et une vue de la cellule triaxiale. Cette machine triaxiale se trouve dans les laboratoires du CERMES à Champs-sur-Marne. Ce dispositif d'essai a été développé en vue de tester des sols et matériaux granulaires comportant éventuellement de gros éléments

nécessitant la reconstitution d'éprouvettes de grand diamètre (sols grossiers, graves, ballasts, microballasts, etc...).

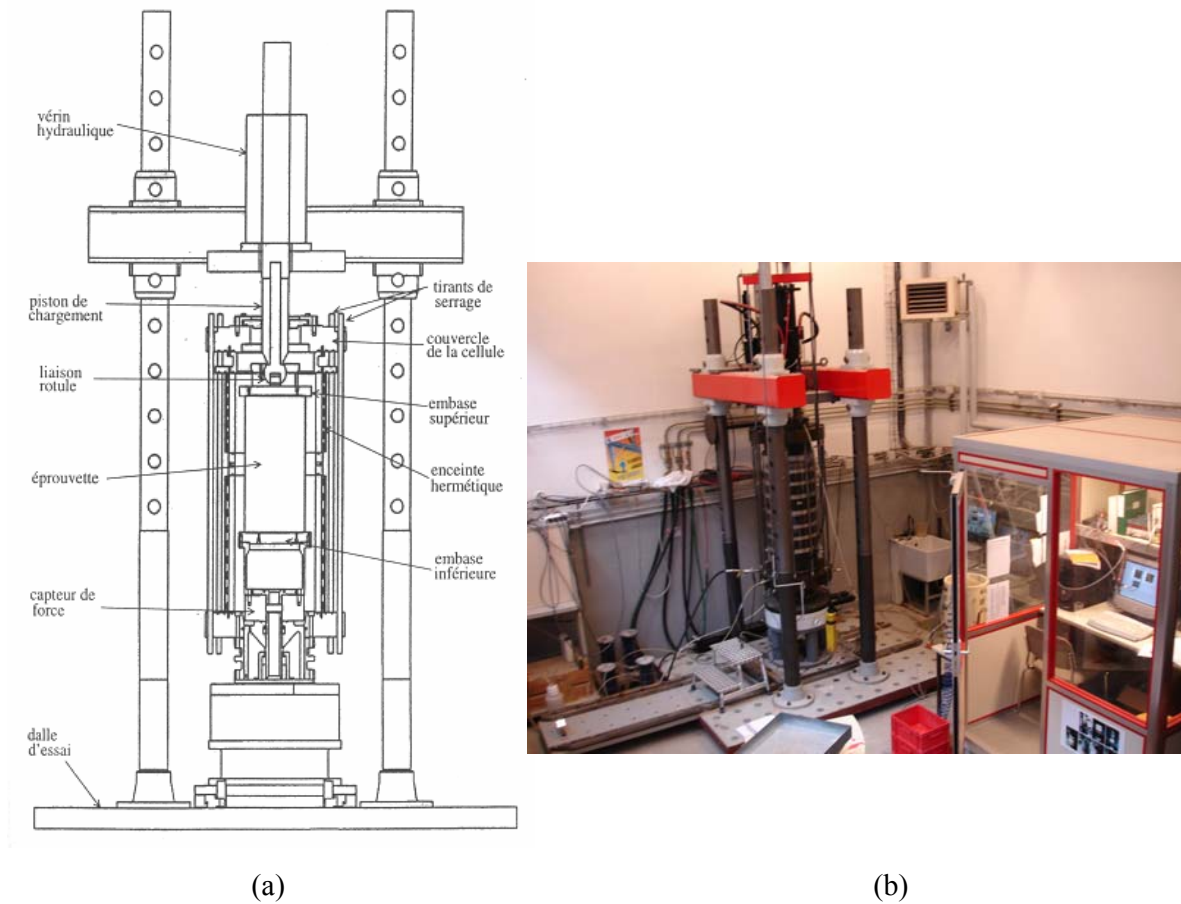


Figure II. 1 : Appareil triaxial Ø 300 mm : (a) schéma simplifié du dispositif d'essai (Pedro (2004)); (b) vue d'ensemble du dispositif d'essai

Le dispositif est constitué d'une cellule triaxiale reposant sur une dalle d'essai (2m50×2m00), équipée d'un bâti de chargement à quatre colonnes, d'un encombrement de 3m50×2m00×1m30. La cellule triaxiale est mobile en translation et rotation (Figure II. 2a). L'éprouvette est préparée à l'extérieur du bâti (Figure II. 2b) puis l'ensemble est positionné sous le servo-vérin (Figure II. 2c) pour l'essai.

L'appareil se compose des éléments suivants :

- une base métallique indéformable dotée, dont la partie haute, d'une base cylindrique de même diamètre que l'éprouvette. Différentes canalisations sont percées dans cette pièce pour assurer le passage des fluides entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule ;

- un embase métallique supérieure, de même diamètre que l'éprouvette et comportant également des circuits de drainage ;

- une enceinte cylindrique composée de plusieurs pièces : deux en plexiglass transparentes, et une métallique centrale pour les sorties des câbles éventuelles ;

- un couvercle métallique comportant un passage central pour le piston ;

- un piston qui doit coulisser dans le couvercle avec un minimum de frottement. Le piston est mis en contact avec l'éprouvette par une rotule pour éviter qu'il ne transmette des moments parasites à l'éprouvette.

Des disques drainants, en bronze fritté, indéformables, assurent le drainage de l'éprouvette par les embases. Ils servent ainsi de filtre pour empêcher l'intrusion de sable dans les circuits de l'appareil.

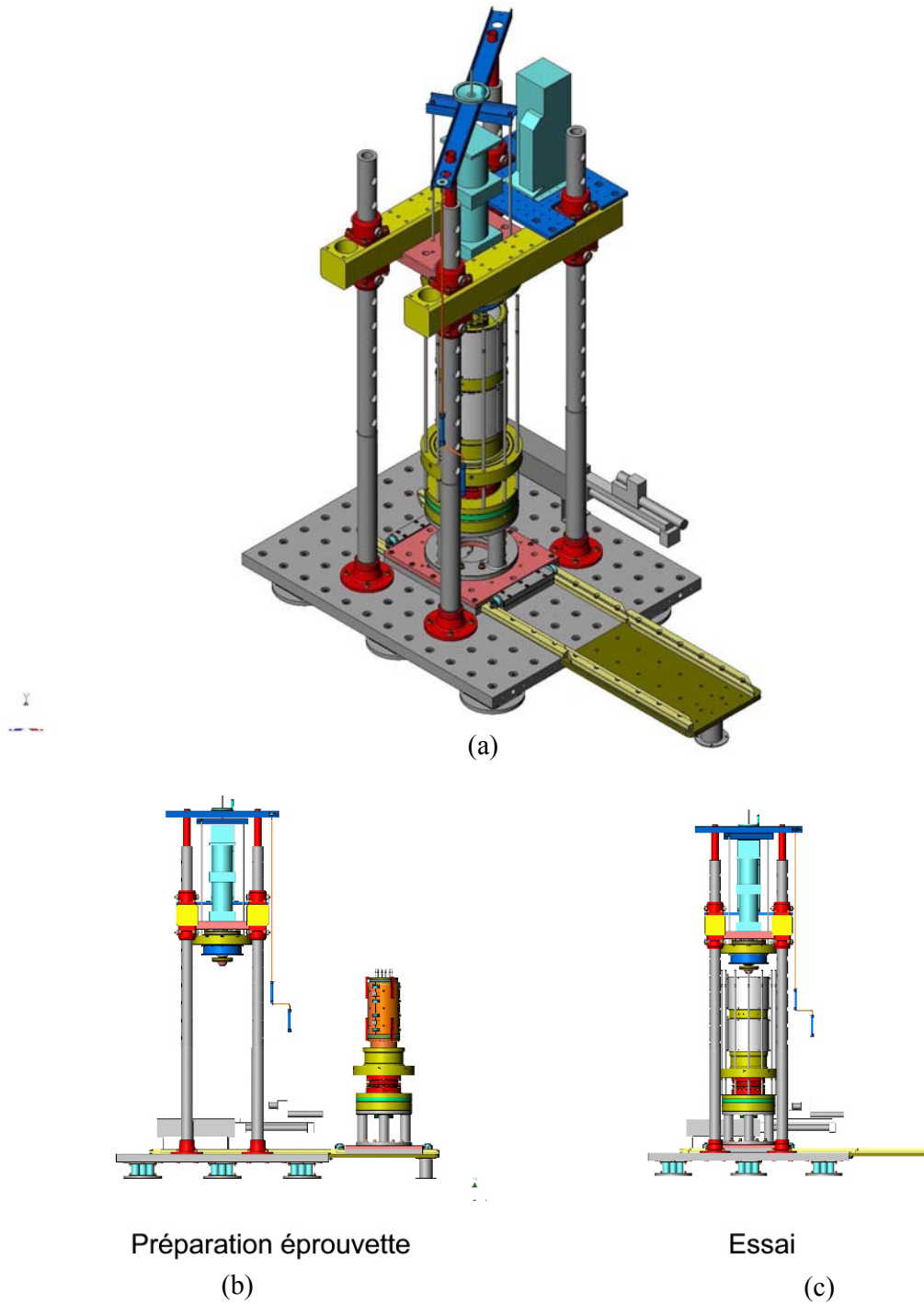


Figure II. 2: Appareil triaxial \varnothing 300 mm : (a) schéma du dispositif d'essai triaxial 300 mm ; (b) préparation de l'éprouvette à l'extérieur du bâti 4 colonnes ; (c) positionnement de l'ensemble sous le servo-vérin

II.1.1.1 Dispositif de chargement vertical

Le chargement axial est assuré par un servovérin de système MTS (Figure II. 3) ayant une capacité de 500 kN. Le piston est constitué en son extrémité par une pièce sphérique qui permet d'avoir une liaison de type rotule lors du chargement de l'éprouvette (donc aucun moment n'est appliqué à l'éprouvette). Ce vérin peut être asservi en force ou en déplacement, en monotone ou en cyclique, par un logiciel de commande (Flextest) (Figure II. 4)).

L'effort axial est mesuré à l'aide d'un capteur de force qui est placé sous l'embase inférieure pour s'affranchir des effets de frottement parasite entre le piston et le couvercle. La précision sur la mesure de l'effort vertical est supérieure à 0,2 kN.

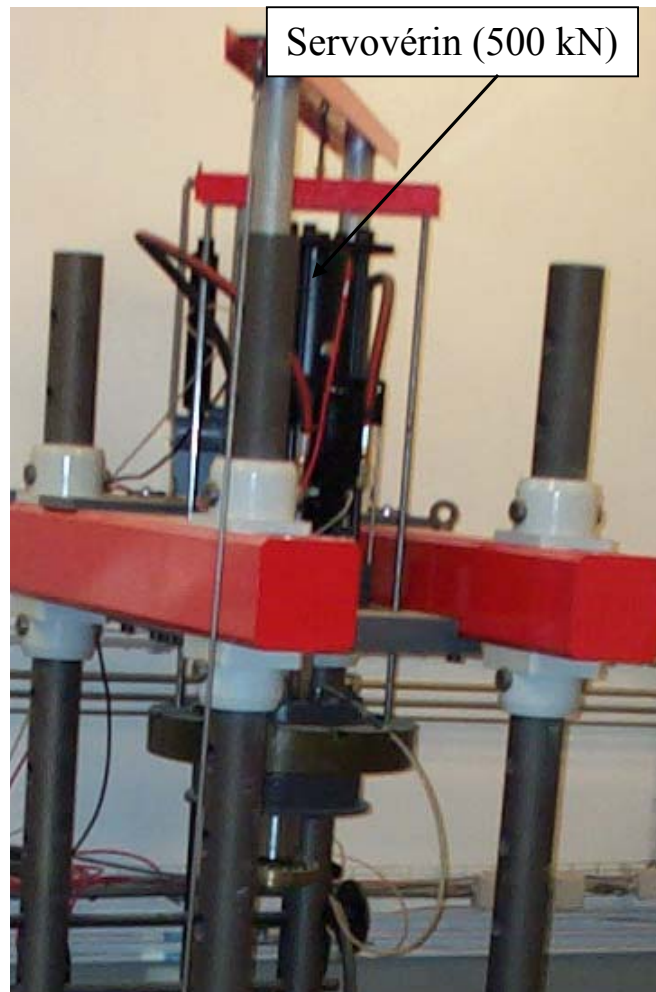


Figure II. 3: Vue du servovérin MTS

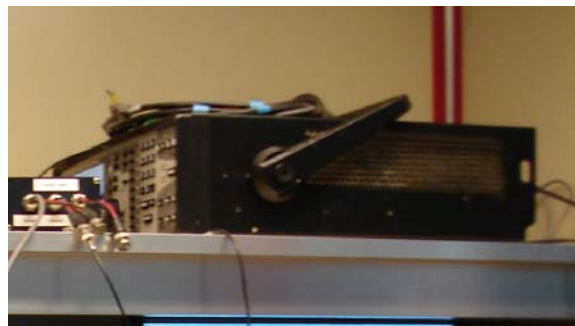


Figure II. 4: Vue du système d'asservissement du vérin (Flextext).

II.1.1.2 Dispositifs de mesure des déformations de l'éprouvette

a) Déformation axiale

La déformation axiale ε_a de l'éprouvette est évaluée à partir de la mesure du déplacement du piston dès que celui-ci est en contact avec l'éprouvette, à l'aide d'un capteur LVDT (comparateur électrique) incorporé au servovérin. La précision de la mesure est supérieure à 0,3 mm et l'étendue de mesure est de 150 mm.

b) Déformation volumique

La déformation volumique de l'éprouvette, ε_v , est déterminée à partir de la mesure de la masse d'eau rentrant ou sortant de l'éprouvette par le circuit d'application de la contre-pression. Ce circuit est constitué de deux cellules air-eau placées sur une balance (Figure II. 5). Les variations de masse sont enregistrées en temps réel sur un micro-ordinateur, via une liaison série. L'éprouvette se contracte ; l'eau interstitielle est expulsée de l'éprouvette vers le circuit ; cela entraîne une augmentation de masse des cellules air-eau et inversement quand l'échantillon se dilate. La balance a une précision de 1 g, ce qui correspond à une précision volumétrique de 1 cm³.

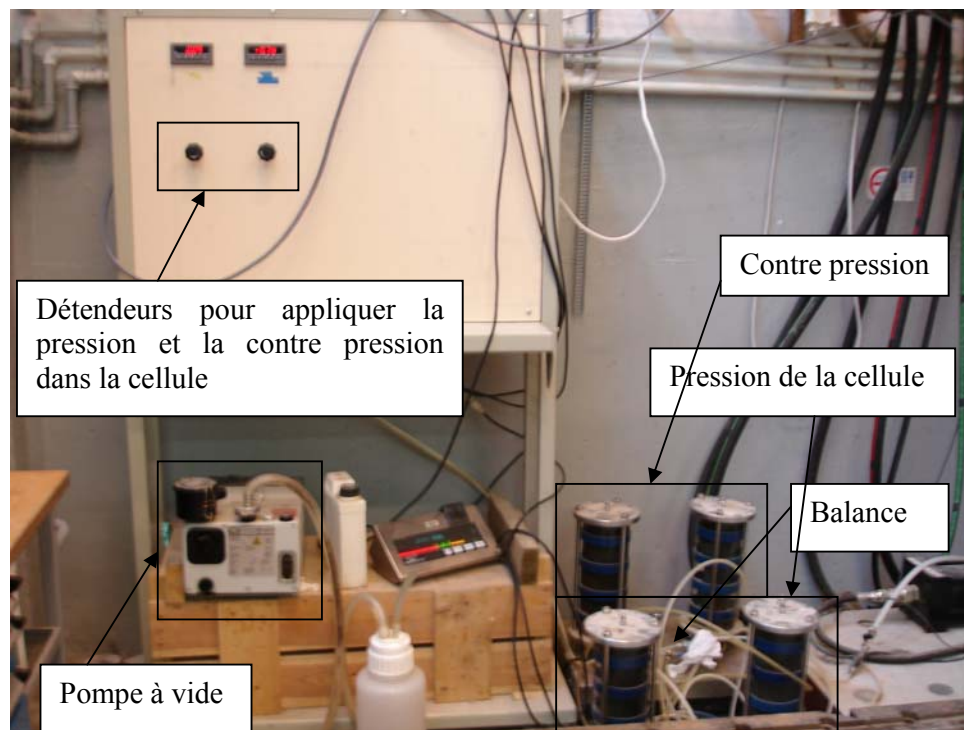


Figure II. 5: Vue du dispositif d'application des pressions et de mesure des déformations volumiques.

c) Contrainte de confinement

Il y a deux manières d'appliquer la contrainte de confinement :

- à l'aide d'un circuit d'application de la pression, qui est composé de deux cellules air-eau (Figure II. 5) ;

- ou bien à l'aide d'un dispositif d'asservissement dynamique de pression (Système MTS, Figure II. 6). Ce dispositif est contrôlé par un logiciel de commande (Flextest).

La contrainte de confinement est mesurée à l'aide d'un capteur de pression classique dont l'étendue de mesure vaut 2000 kPa. La précision de mesure est supérieure à 1 kPa.

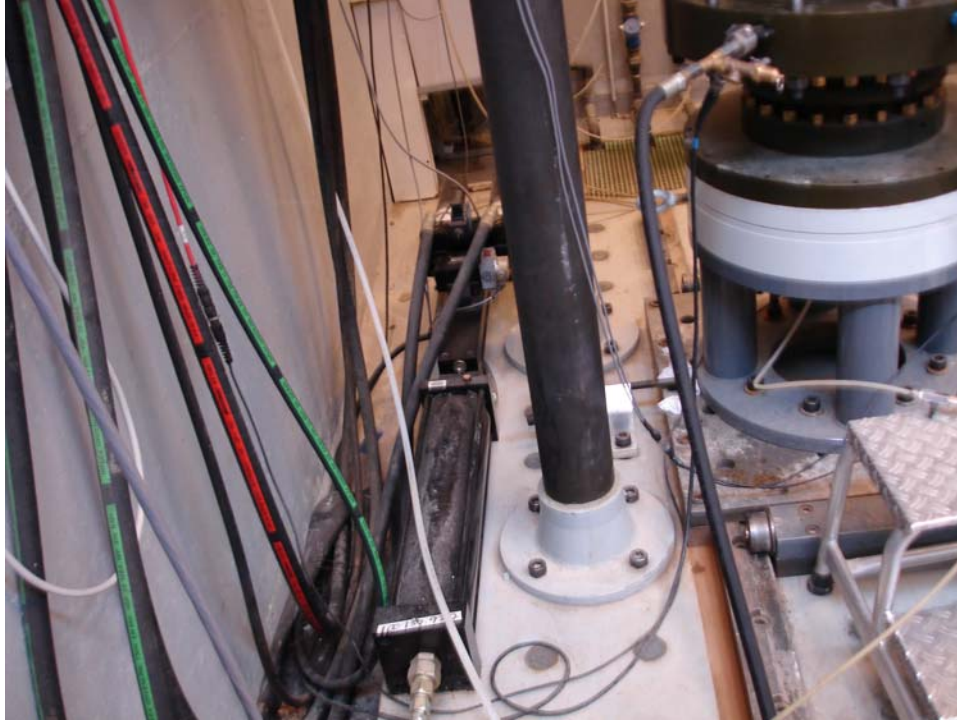


Figure II. 6: Vue du dispositif d'asservissement dynamique de pression

II.1.2. Réalisation d'une éprouvette dans la cellule triaxiale Ø 300 mm

Du fait de sa taille, la machine triaxiale Φ 300 mm requiert une procédure d'utilisation particulière, même si celle-ci est analogue à celle utilisée sur les dispositifs triaxiaux standards. Dans un premier temps, l'éprouvette est reconstituée, et la base est initialement déplacée en dehors de l'emprise du bâti de chargement, ce qui permet d'avoir tout l'espace de travail nécessaire et d'assurer la fabrication de l'éprouvette. Les enceintes extérieures sont alors positionnées. L'ensemble est ensuite déplacé sous le servovérin. On solidarise, avec 12 tirants, la partie haute de la cellule (couvercle de la cellule) et la partie basse (base). La cellule est ensuite remplie d'eau et on applique une pression initiale de maintien et l'état de

consolidation souhaité est ensuite appliqué (pression isotrope et déviateur initial éventuel). Le chargement est ensuite appliqué grâce au servovérin selon le programme d'essai prédéfini.

La Figure II. 1b, page 65, représente l'ensemble du dispositif expérimental, avec de gauche à droite, l'enceinte contenant l'échantillon à tester, le dispositif de servovérin, et la cabine de pilotage et d'acquisition des données.

Le montage de l'éprouvette dans la cellule ϕ 300 mm est effectué comme suit (Figure II. 7):

- a. mise en place d'une pierre poreuse sur l'embase inférieure ;
- b. fixation de la membrane préalablement nettoyée autour de l'embase inférieure avec un joint torique ;
- c. installation du moule sur l'embase inférieure, puis on rabat la membrane sur la partie supérieure ;
- d. mise sous vide dans le moule pour que la membrane se plaque contre la paroi intérieure ;
- e. montage de l'échantillon en déversant le matériau dans le moule par couches successives, en compactant les matériaux étudiés à l'aide d'un appareil de compactage manuel ou bien par vibrocompactage. Dans le cas de l'utilisation d'inclusions de taille 30-60 mm, il est nécessaire de placer les inclusions de manière à éviter de toucher la membrane ou d'entrer en contact avec d'autres inclusions plus volumineuses (en effet, un tel contact introduirait une résistance supérieure et fausserait l'expérience). Une fois les 10 couches réalisées, on positionne une seconde pierre poreuse ;
- f. mise en place de l'embase supérieure sur la pierre poreuse, au-dessus de l'échantillon. On rabat la membrane et on place un joint torique ;
- g. application du vide dans l'échantillon, démontage du moule ;
- h. installation des enceintes et des tirants ;
- i. déplacement de la cellule au-dessous du vérin ;
- j. positionnement du vérin et solidarisation éventuelle pour les essais cycliques ou d'extension ;
- k. abaissement du couvercle et fermeture de la cellule par des tirants de serrage ;

- l. remplissage de la cellule d'eau ;
- m. application de la pression de confinement dans la cellule avec diminution de la pression de vide à l'intérieur de l'échantillon simultanément ;
- n. application de la sollicitation à l'aide du vérin hydraulique MTS.

Dans le cas d'une éprouvette saturée, on poursuit de la façon suivante, à partir de l'étape l :

- o. mise en circulation à l'intérieur de l'éprouvette de dioxyde de carbone (CO_2) sous une pression entre 20 kPa et 30 kPa après l'application de la pression de confinement ;
- p. saturation de l'éprouvette avec de l'eau désaérée dont la quantité est égale à deux fois le volume d'eau injecté, lorsque l'eau arrive en haut de l'échantillon ;
- q. amélioration de la saturation de l'éprouvette en appliquant la contre-pression (effet de compression et de dissolution des bulles de gaz dans le liquide interstitiel). La contre-pression est appliquée de façon progressive avec l'augmentation de la contrainte de cellule, de manière à ce que la différence entre les deux reste égale à la valeur de la contrainte de consolidation voulue. On atteint en général un coefficient de Skempton (B) de l'ordre de 0,98 ;
- r. lancement de l'essai : application de la force axiale à l'aide du vérin hydraulique MTS. Les capteurs enregistrent l'évolution du déplacement du vérin, de la variation de la masse des cellules air-eau reliées à l'éprouvette due à la sortie et/ou à la rentrée de l'eau, et de la force axiale (Figure II. 8 et Figure II. 9).



Figure II. 7 : Procédure expérimentale : montage de la cellule triaxiale

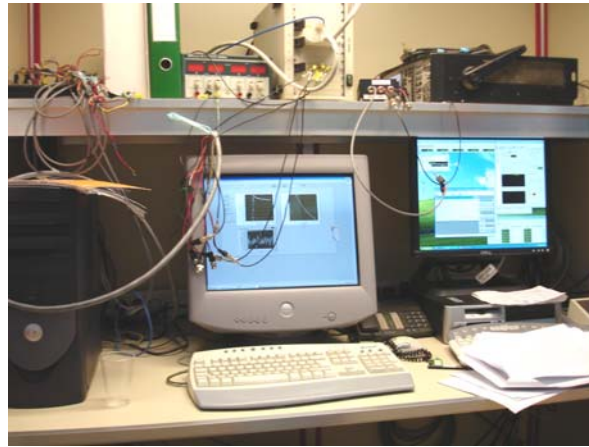


Figure II. 8: Affichage des mesures en cours d'essai sur les écrans de deux ordinateurs



Figure II. 9: Cellules et balance permettant de mesurer les variations de volume de l'éprouvette

II.1.3 Présentation de l'appareil triaxial Ø100mm

Une partie des essais ont été réalisés à l'aide de l'appareil triaxial de petite taille, sur les sols naturels écrêtés ou substitués, pour la validation de la méthodologie de caractérisation des sols grossiers naturels. Ce dispositif permet de tester des éprouvettes ayant un diamètre de 100 mm et de 200 mm de hauteur (Figure II. 10)



Figure II. 10: Vue de la cellule triaxiale Ø100 mm

Les éprouvettes peuvent être soumises à un chargement isotrope ou à un cisaillement triaxial de révolution en compression à taux de déformation axiale contrôlé. La base inférieure de la cellule est équipée d'un piston, mobile verticalement, qui assure l'effort vertical appliqué sur l'éprouvette. Les éprouvettes sont alors soumises à un état de contrainte initial donné (isotrope) appliqué à l'aide d'une cellule air-eau, puis soumise à une sollicitation de cisaillement en compression. Lors des essais, on réalise des mesures de pression (pression de confinement, pression interstitielle éventuelle dans le cas saturé), des mesures d'effort, des mesures de variation du volume des éprouvettes (cas saturé) et des mesures de variation de déplacement nécessaires au calcul des déformations volumique et axiale de l'éprouvette (mesures globales). L'effort axial est mesuré à l'aide d'un capteur de force qui est placé au-dessus de la cellule. La capacité maximale est de 32 kN et la précision est de l'ordre de 16 N, soit 0,05 % de l'étendue du capteur. Pour évaluer la déformation axiale ϵ_a de l'échantillon, on mesure le déplacement vertical de la cellule à l'aide du LVDT intégré ; le point de mesure se situe à la base de la cellule. Ce type de capteur a une précision suffisante par rapport à la norme NFP94-074, et il présente une étendue de mesure de 40 mm. La détermination de la variation volumique de l'éprouvette est obtenue en quantifiant le volume d'eau drainé par l'échantillon. Le dispositif de mesure utilisé est un volumètre de marque Wykeham-Farrance

de capacité de 100 cm^3 . Cet appareil est placé en série entre le système d'asservissement de la contre-pression. Ce dispositif de mesure a une précision de $\pm 0,05 \text{ cm}^3$.

Un logiciel, développé sous Labview, permet de visualiser, au cours de l'essai, les différentes grandeurs mesurées et de les enregistrer pour un traitement ultérieur (Figure II. 11).

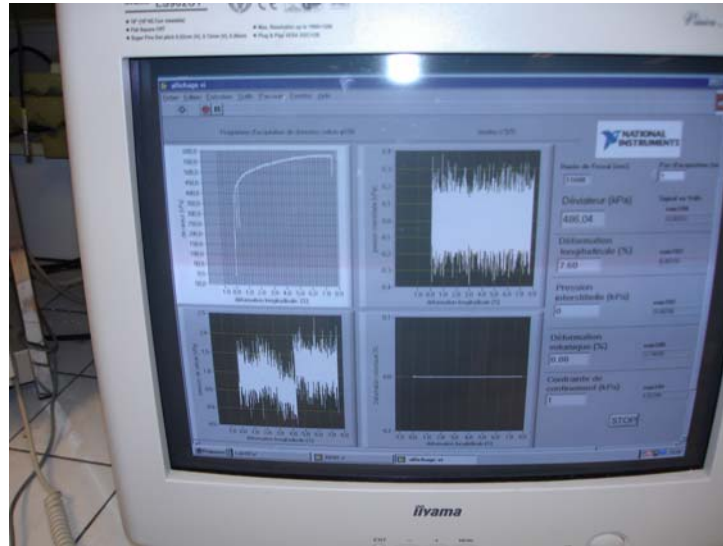


Figure II. 11: Ecran d'affichage du programme d'acquisition développé sous Labview

II.2. Appareil de cisaillement direct

Ce paragraphe est consacré à la présentation des appareils de cisaillement direct utilisés pour caractériser le comportement mécanique des éprouvettes de sol grossier modèle.

II.2.1 Présentation de l'appareil de cisaillement direct

Le dispositif expérimental (Figure II. 12) utilisé pour cette étude est la boîte de cisaillement, de grandes dimensions (300 mm de longueur, 300 mm de largeur et 180 mm de hauteur totale), (Figure II. 13). Ce dispositif est également adapté pour tester des éprouvettes de dimensions moyennes (150 mm de longueur, 150 mm de largeur et de 120 mm de hauteur totale) en plaçant la petite boîte dans la grande boîte, (Figure II. 14). Ce dispositif se trouve à l'Université Libanaise, à la Faculté de Génie, à Beyrouth.



Figure II. 12: Vue générale de la boîte de cisaillement direct

L'appareil de cisaillement direct se compose des éléments mécaniques suivants:

- la boîte de cisaillement est divisée en deux demi-boîtes: une boîte inférieure mobile et une boîte supérieure fixe ;
- quand la boîte inférieure se déplace, le déplacement horizontal δ_h est mesuré par un capteur de déplacement de type LVDT dont la précision est inférieure à 0,05 mm (0,1 % de l'étendue du capteur qui vaut 50 mm) ;
- la force de cisaillement T est mesurée par le capteur d'effort placé horizontalement dont la capacité maximale est de 100 kN. La précision du capteur est de 10 N (0,01 % de l'étendue de capteur) ;
- au dessus de la boîte supérieure, est placé le système de chargement vertical constitué d'un piston hydraulique. Le capteur d'effort vertical a une capacité maximale de 100 kN. Le déplacement vertical est mesuré à partir du capteur de déplacement de type LVDT. La précision du capteur est inférieure à 0,4 kN (0,4 % de l'étendue du capteur) ;
- la vitesse de cisaillement est réglée à l'aide d'un variateur de vitesse. La valeur retenue pour tous les essais est de 0,5 mm/min (0,16 %/min) ;

- les mesures délivrées par les différents capteurs sont enregistrées et traitées par un système informatique associé au pilotage de l'essai (Figure II. 15).

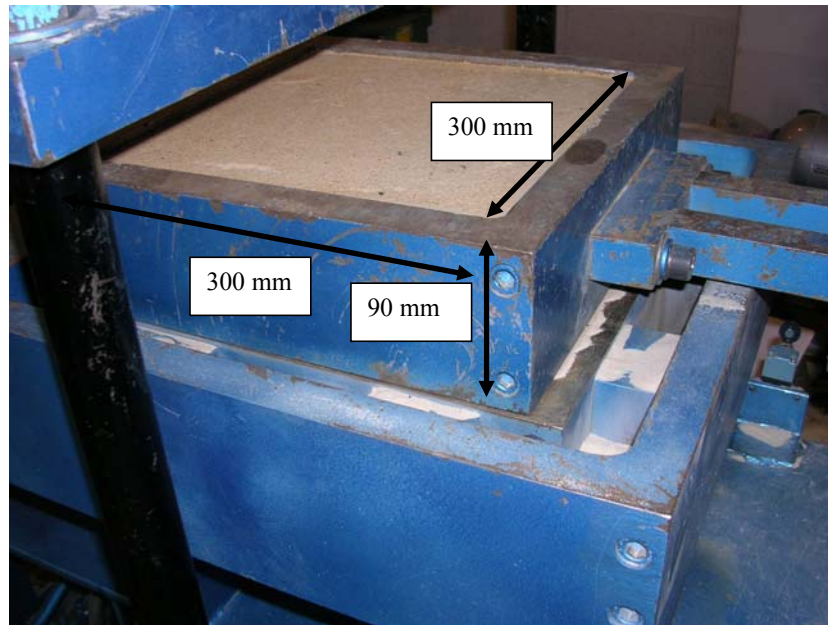


Figure II. 13: Dimensions de la grande boîte de cisaillement direct



Figure II. 14: Vue de la boîte de taille moyenne placée à l'intérieur de la grande boîte de cisaillement direct

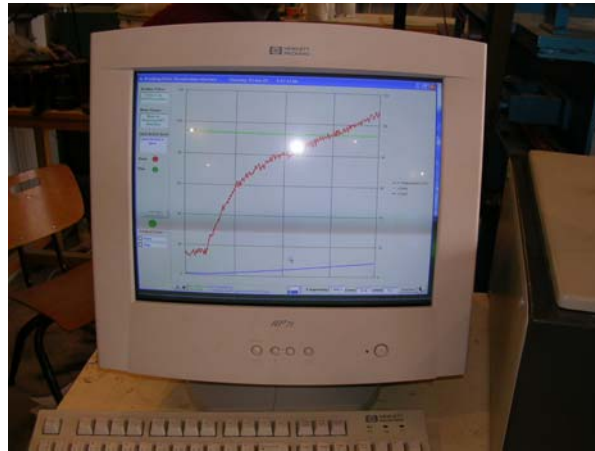


Figure II. 15 : Ecran de contrôle et de visualisation des mesures en cours d'essai

II.2.2. Mode opératoire de l'essai à la boîte de cisaillement

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol, de dimensions 300x300x180 mm (ou bien de dimensions 150x150x120 mm). Il consiste à appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical à l'aide d'un système de chargement hydraulique, maintenu constant pendant toute la durée de l'essai. Après la mise sous contrainte de l'éprouvette sous l'effort vertical, la demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à une vitesse de cisaillement constante. Lors d'un essai, on mesure la force totale F de cisaillement, le déplacement horizontal et le déplacement vertical et on les enregistre grâce à un système informatique de contrôle et d'acquisition des données.

II.3. Matériaux constitutifs des éprouvettes testées

Cette section présente le type de sol de référence utilisé et le choix des constituants (de la matrice et des inclusions). En ce qui concerne le sol naturel, il sera présenté dans le chapitre 5.

II.3.1 Sol de référence utilisé

Plusieurs auteurs ont étudié le comportement de sols grossiers naturels en laboratoire, mais avec ces matériaux il est très difficile de réaliser des essais de répétabilité pour valider les résultats obtenus. Pour cela, nous allons étudier le comportement de sols grossiers en utilisant un sol de référence qui nous permet d'obtenir une très bonne répétabilité de

fabrication et d'étudier l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique de ce sol, comme la taille des inclusions, la fraction volumique et l'étalement granulométrique. Ce sol de référence présente deux caractéristiques principales.

- La première caractéristique est d'avoir une distribution granulométrique binaire, c'est-à-dire constituée de deux ensembles de taille de grains : les inclusions et la matrice.

Pour distinguer les deux fractions granulométriques, l'étude bibliographique a montré qu'il existe deux critères. La première option consiste à considérer que les inclusions sont les éléments dont la taille est supérieure à environ 4,5mm ; cette valeur correspond à peu près à l'ouverture du tamis no.4 qui constitue, selon la classification USCS, la frontière entre la classe granulométrique des sables et celle des graviers. Une seconde option consiste à définir les inclusions comme étant les éléments du sol grossier, dont la taille est trop élevée pour qu'ils puissent être étudiés au laboratoire sur des éprouvettes de taille classique.

Nous avons choisi un critère qui dépend exclusivement de la distribution granulométrique du matériau. En effet, pour distinguer la matrice des inclusions, nous nous sommes basés sur le critère suivant (d'après Pedro 2004) : le rapport entre la taille moyenne des constituants ($d_{50,mat}$) et celle des inclusions ($d_{50,incl}$), $d_{50,incl}/d_{50,mat}$ doit être supérieur à 10. Cette valeur seuil est choisie afin de pouvoir considérer que la matrice est homogène par rapport aux inclusions.

- La seconde caractéristique concerne l'arrangement des inclusions. Dans un volume de sol de référence, les inclusions peuvent être réparties de façon aléatoire. De plus, on fait l'hypothèse qu'au sein d'un échantillon de sol, les inclusions sont non jointives (Figure II. 16). La proportion d'inclusions et le mode de fabrication des éprouvettes sont choisis de façon à s'assurer de la validité de cette hypothèse.

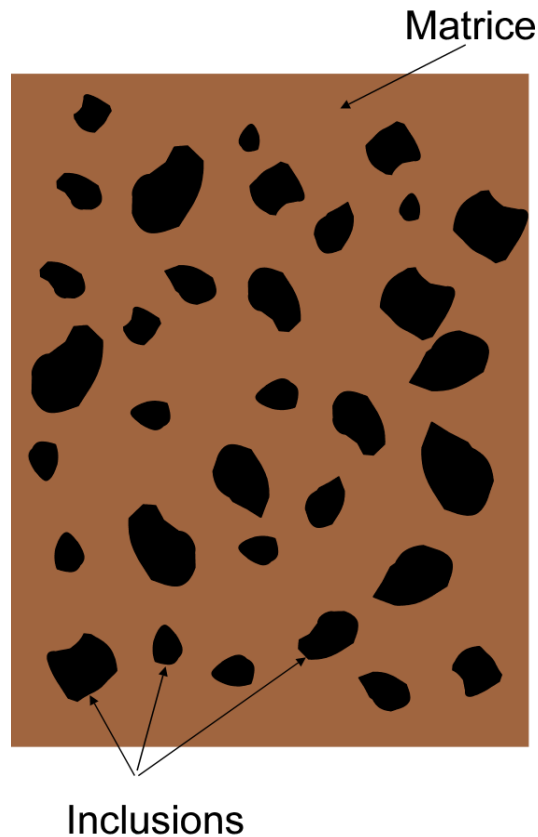


Figure II. 16: Représentation schématique d'un sol grossier à matrice

II.3.2 Le choix des constituants des sols grossiers de référence étudiés

En général, le sol grossier est un mélange d'une matrice avec des inclusions de nature quelconque. Celles-ci peuvent être de nature, de forme ou de taille variées. La matrice peut être constituée de sable, de limon, d'argile ou d'un mélange de ces éléments.

a) Les constituants de la matrice

Le type de sol grossier de référence dont nous allons étudier le comportement est constitué d'une matrice sableuse ; elle sera constituée de sable de Fontainebleau.

Nous avons fait ce choix de matrice sableuse pour deux raisons principales.

La première motivation est liée à la facilité d'utilisation de ce type de matrice, et au fait que le sable permet d'isoler l'effet exclusivement dû aux propriétés de la phase inclusionnaire.

La deuxième motivation est liée au diamètre moyen des grains (d_{50} vaut 0.20 mm), (Figure II. 17), qui permet de respecter le rapport de taille ($d_{50, incl}/d_{50, mat} > 10$ et $\varnothing_{\text{éprouvette}}/d_{max, incl} > 6$ dans le cas d'un essai triaxial, et $D_{max}/d_{max, incl} > 10$ dans le cas d'un essai à la boîte de cisaillement)

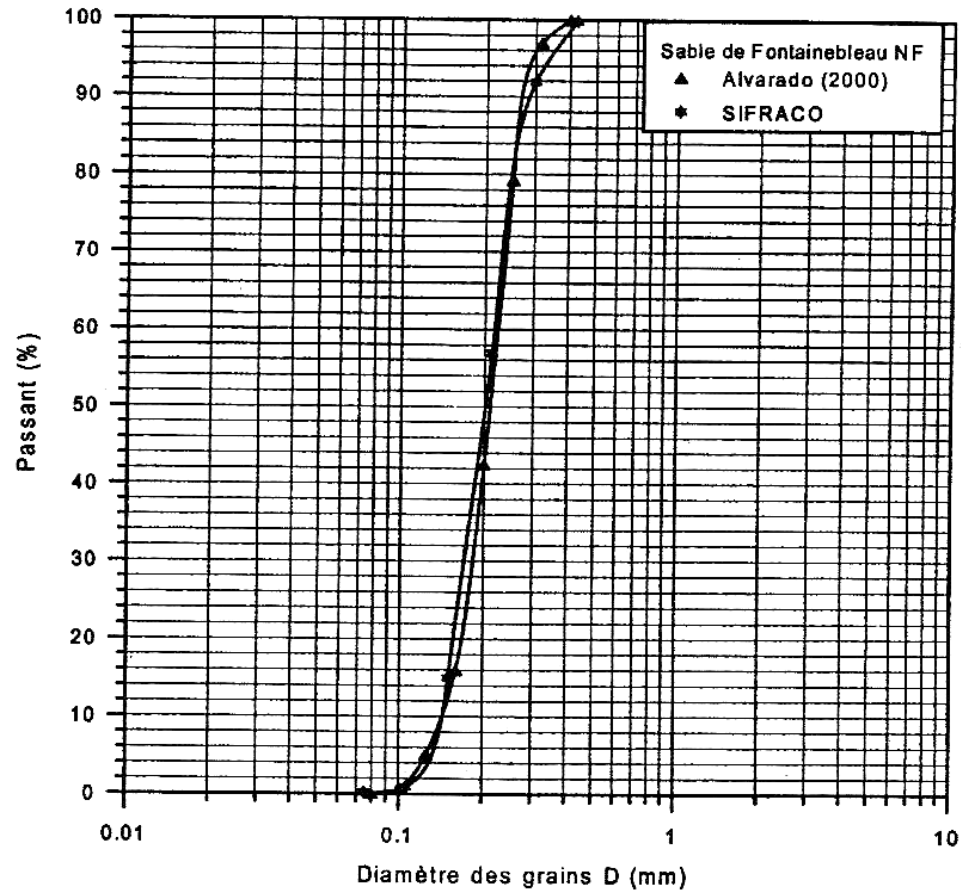


Figure II. 17 : Courbes granulométriques du sable de Fontainebleau (Benahmed, 2001)

Les caractéristiques physiques de ce sable sont répertoriées dans le Tableau II. 1.

D_{50} (mm)	C_U	e_{min}	e_{max}	$\rho_s(g/cm^3)$	$\rho_{d,min}(g/cm^3)$	$\rho_{d,max}(g/cm^3)$
0,21	1,52	0,54	0,94	2,65	1,37	1,72

Tableau II. 1: Caractéristiques du sable de Fontainebleau (Benahmed, 2001)

La Figure II. 18 présente une vue du sable de Fontainebleau utilisé.



Figure II. 18: Vue du sable de Fontainebleau constituant la matrice du sol grossier de référence.

b) Matériau constituant les inclusions

Les inclusions que nous avons choisies sont des graviers naturels, de forme anguleuse et à surface rugueuse. La masse volumique du matériau constitutif est identique à celle du sable ($\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$), et le diamètre maximal utilisé est de 60 mm (Figure II. 19) ce qui permet de s'assurer que le rapport de taille entre le diamètre des plus gros éléments et celui de l'éprouvette est suffisant pour éviter les effets d'échelle (Valle [2001]).



Figure II. 19: Vue des graviers utilisés

II.4 Paramètres d'identification du sol grossier de référence

Les paramètres qui caractérisent le matériau sont la taille des inclusions, leur fraction volumique f_v et l'indice de densité de la matrice (Figure II. 20). Nous allons voir dans cette partie comment calculer les masses des différents composants et le mode de préparation des éprouvettes.



Figure II. 20: Matrice sableuse et inclusions (graviers anguleux)

II.4.1 Calcul des masses

L'ensemble des paramètres sont présentés dans le Tableau II. 2.

Paramètres	Description
f_v	Fraction volumique d'inclusions
I_D	Indice de densité de la matrice dans l'éprouvette
e_{\max}	Indice des vides maximal de la matrice
e_{\min}	Indice des vides minimal de la matrice
$\rho_{s,\text{mat}}$	Masse volumique des particules solides (matrice)
$\rho_{s,\text{incl}}$	Masse volumique des inclusions

Tableau II. 2: Données utiles à la fabrication des éprouvettes

a) Les inclusions

La proportion d'inclusions est représentée par le paramètre f_v qui correspond à la fraction volumique d'inclusion. Ce paramètre est égal au rapport entre le volume d'inclusions contenues dans l'éprouvette et le volume total de l'éprouvette.

On souhaite fabriquer une éprouvette d'indice de densité de matrice I_D , avec une fraction volumique d'inclusion f_v .

On obtient les équations suivantes :

$$f_v = \frac{V_{\text{incl}}}{V_{\text{total}}} \quad (2.1)$$

$$V_{\text{total}} = V_{\text{incl}} + V_{\text{mat}} ;$$

et

$$V_{\text{mat}} = V_{\text{grains}} + V_v ;$$

avec

V_{total} : volume total de l'éprouvette ;

V_{incl} : volume de l'inclusion ;

V_{mat} : volume de la matrice ;

V_{grains} : volume des grains de la matrice ;

V_v : volume des vides dans l'éprouvette.

Comme f_v et V_{total} sont connus, on peut donc déduire le volume d'inclusions correspondant :

$$V_{\text{incl}} = f_v \times V_{\text{total}} \quad (2.2)$$

Connaissant V_{incl} , on peut calculer la masse d'inclusion:

$$M_{\text{incl}} = \rho_{s,\text{incl}} \times V_{\text{incl}} \quad (2.3)$$

avec:

M_{incl} : masse de l'inclusion

$\rho_{s,\text{incl}}$: masse volumique des inclusions.

b) La matrice

En ce qui concerne, l'état de densité de la matrice, nous avons choisi de fixer ce paramètre constant pour tous les essais.

Rappelons que l'indice de densité I_D est par définition :

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.4)$$

Ce qui permet d'obtenir e , indice des vides de la matrice dans l'éprouvette

$$\Rightarrow e = e_{\max} - I_D (e_{\max} - e_{\min}) \quad (2.5)$$

Il nous faut trouver $\rho_{d,mat}$, la masse volumique des particules solides de la matrice à insérer.

$$\text{Comme } e = \frac{\rho_{s,mat}}{\rho_{d,mat}} - 1 \quad \Rightarrow \quad \rho_{d,mat} = \frac{\rho_{s,mat}}{1 + e} \quad (2.6)$$

$\rho_{d,mat}$ = masse volumique de la matrice sèche.

On en déduit la masse de la matrice à insérer :

$$\rho_{d,mat} = \frac{M_{d,mat}}{V_{mat}} \quad \Rightarrow \quad M_{d,mat} = \rho_{d,mat} \times V_{mat} \quad (2.7)$$

avec

$M_{d,mat}$: Masse sèche de la matrice

II.5 Fabrication de l'éprouvette

La procédure de fabrication des éprouvettes a été développée par Pedro (2004). Elle est rappelée brièvement ci-dessous pour les deux dispositifs expérimentaux présentés.

II.5.1 Fabrication des éprouvettes dans l'appareil triaxial Ø 300 mm

Les éprouvettes sont fabriquées en compactant manuellement 10 couches de sol de 6 cm chacune (Figure II. 21):

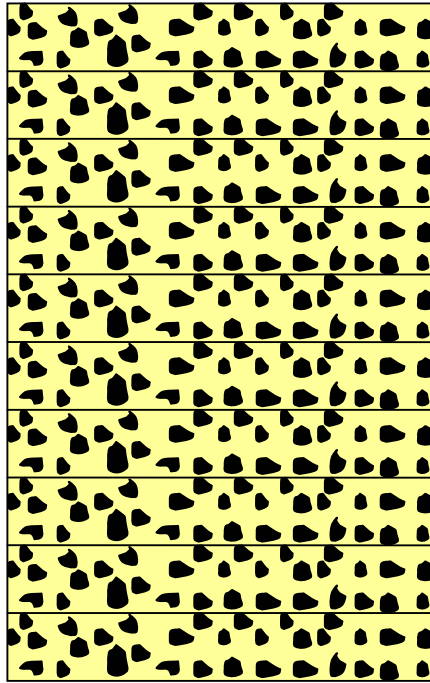


Figure II. 21: Fabrication d'une éprouvette de sol en Ø 300 mm

II.5.2 Fabrication des éprouvettes dans la grande boîte de cisaillement

Dans la grande boîte de cisaillement, la procédure de fabrication des éprouvettes est la même que celle utilisée pour l'appareil triaxial, mais on compacte successivement 3 couches. Une première couche de 45 mm, une deuxième de 90 mm et une troisième de 45mm (Figure II. 22).

Chaque couche est constituée d'un mélange de sable et d'une proportion de graviers égale à f_v . Le mélange des deux matériaux est humidifié et homogénéisé de façon à prévenir tout phénomène de ségrégation granulaire (Figure II. 23). On s'assure ainsi d'une répartition homogène des graviers au sein de la matrice sableuse. La quantité d'eau utilisée pour humidifier le sol correspond à une teneur de 5% de la masse de sable.

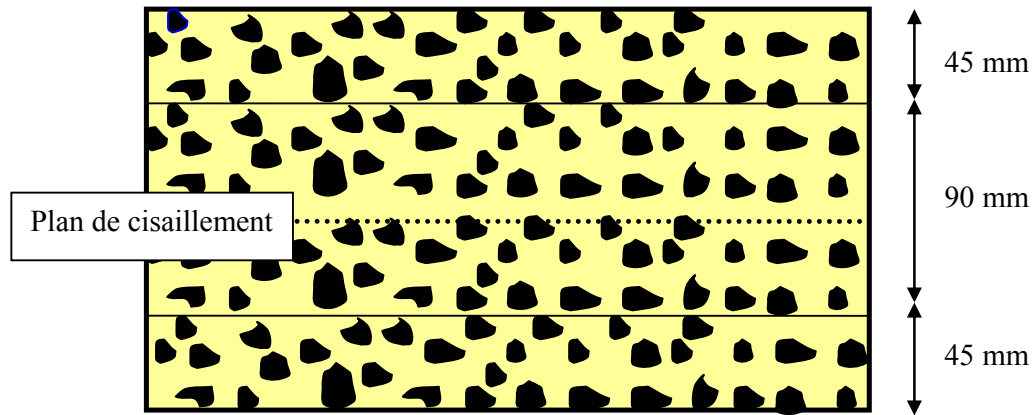


Figure II. 22: Fabrication d'une éprouvette de sol modèle dans la grande boîte de cisaillement

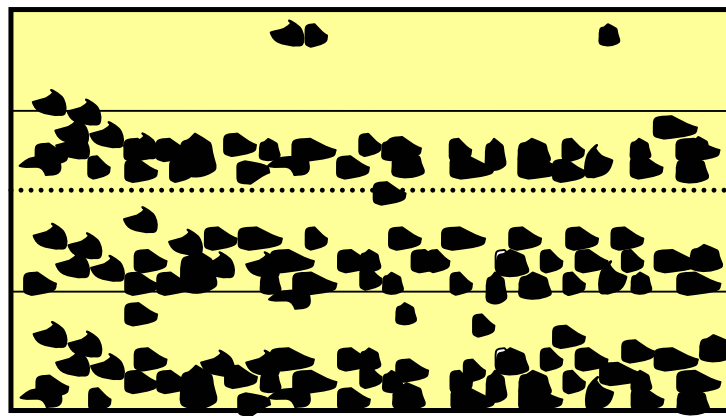


Figure II. 23: Exemple de ségrégation des particules

II.6 Influence de la réutilisation des matériaux

Lors des premiers essais nous avons utilisé plusieurs fois le même sable qui a été récupéré à la fin de chaque essai. On s'est aperçu (Figure II. 24a) que le déviateur q diminue quand le sable est réutilisé plusieurs fois. Par contre, il n'y a pas de différence si le sable mis en place est neuf. Cela indique une évolution du matériau au cours des essais (création de fines, rupture et attrition des grains). On constate également, sur la Figure II. 24b, que le sol est moins dilatant si on réutilise plusieurs fois la même matrice.

Pour éviter ce phénomène et ainsi avoir une bonne répétabilité, nous avons décidé d'utiliser une matrice neuve pour chaque essai.

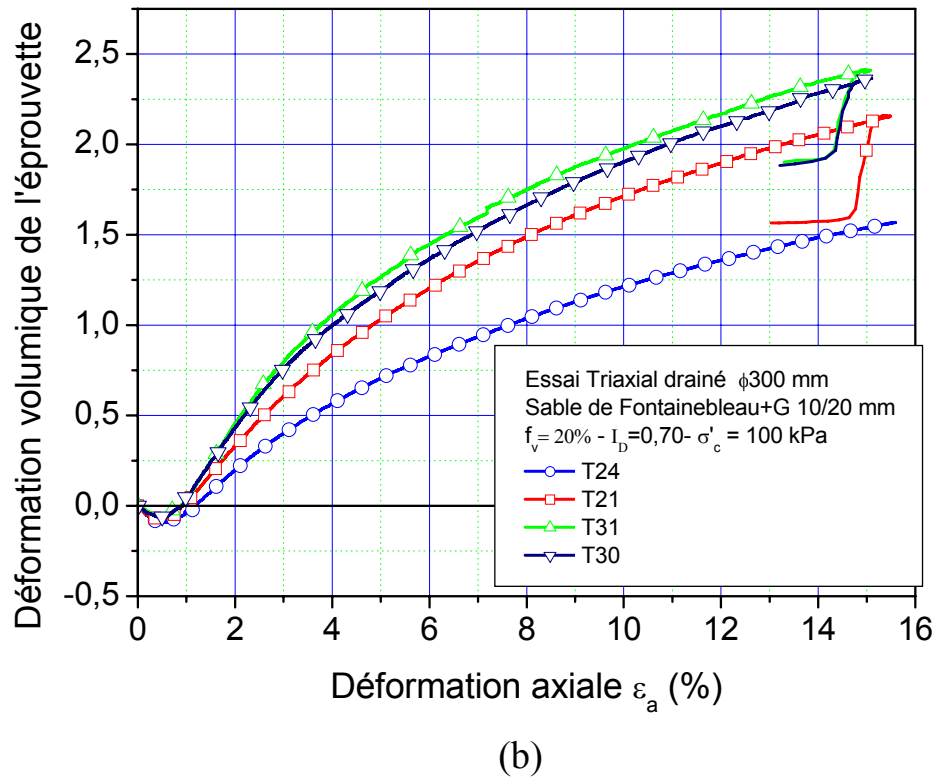
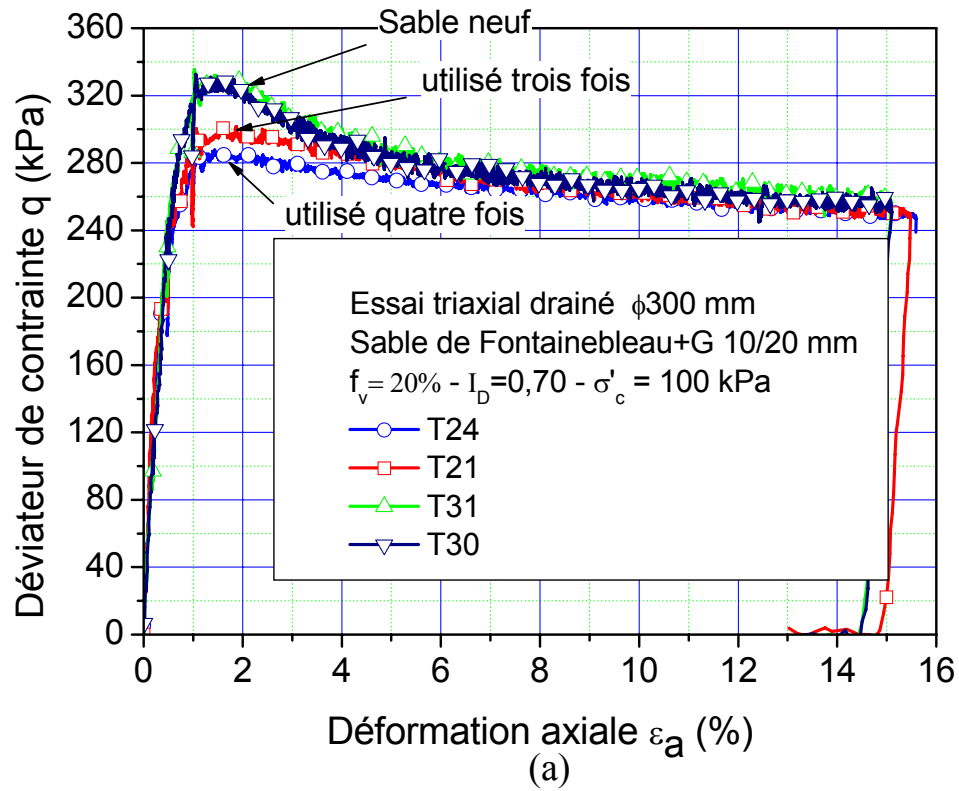


Figure II. 24: Résultats expérimentaux des essais triaxiaux $\phi 300$ mm montrant l'effet des fines sur le comportement du sol grossier modèle: (a) courbe déviateur-déformation axiale ; (b) courbe déformation volumique- déformation axiale.

II.7 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté les deux dispositifs triaxiaux utilisés. L'un des dispositifs est de grandes dimensions. Il a été développé au CERMES. Il permet de tester des éprouvettes de grandes tailles (300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur). L'intérêt de ce dispositif est de tester des éprouvettes qui contiennent des éléments de grande taille ce qui permet d'aller loin dans l'étude des paramètres qui ont une influence sur le comportement des sols grossiers, en particulier, l'effet de la taille des inclusions et l'effet de l'étalement granulométrique des inclusions. Il faut aussi pouvoir tester un volume de sol suffisamment important pour qu'il soit représentatif. L'autre dispositif triaxial de taille moyenne, permet de tester des éprouvettes de 100 mm de diamètre et 200 mm d'hauteur. Il est utilisé pour étudier le comportement des sols grossiers naturels écrêtés à 20 mm, à 16 mm et à 10 mm.

Nous avons présenté également, une machine de cisaillement direct de grandes dimensions. C'est un nouveau dispositif, fabriqué au Liban, qui permet de tester des éprouvettes de grandes dimensions, de 300 mm de longueur, de 300 mm de largeur et de 180 mm de hauteur. L'intérêt d'utiliser cette machine est de voir comment le comportement des sols grossiers évolue avec le type de dispositif utilisé.

Ensuite, nous avons présenté les sols grossiers de référence utilisés dans le cadre de ce travail et la méthode de caractérisation utilisées.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES SOLS GROSSIERS A L'AIDE DE L'APPAREIL TRIAXIAL Ø300 mm

Dans ce chapitre on étudie le comportement mécanique des sols grossiers de référence à l'aide de l'appareil triaxial Ø300 mm, secs ou saturés, en conditions drainées. L'influence de différents paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique sera étudiée.

Nous présentons tout d'abord les résultats typiques obtenus à l'aide de l'appareil triaxial Ø300 mm et l'étude de répétabilité qui a permis de valider la procédure expérimentale (paragraphe II.5.1). Ensuite, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus relatifs à l'influence des propriétés des inclusions (fraction volumique f_v , taille et étalement granulométrique) sur le comportement mécanique pour deux indices de densité de la matrice : 0,70 et 0,30. Puis, on examine l'influence de l'état de densité de la matrice et de la contrainte de confinement isotrope σ'_c sur les résultats obtenus.

Finalement, à partir des résultats des essais, nous estimons les caractéristiques à la rupture du matériau, ainsi que la notion de seuil caractéristique.

III.1. Programme expérimental

Pour être capable de caractériser le sol grossier et de trouver une méthodologie de caractérisation de ces sols à l'aide des appareils de laboratoire de taille courante, il est intéressant d'étudier l'influence des propriétés des inclusions et de la matrice sur le comportement des sols grossiers. Pour cela, nous avons réalisé le programme expérimental suivant :

- 1- Étude de l'influence des propriétés des inclusions sur le comportement du sol grossier pour deux états de l'indice de densité de la matrice, un état moyennement dense ($I_D = 0,70$), et un état lâche ($I_D = 0,30$).

a) Etude de l'effet de la fraction volumique des inclusions f_v

Pour étudier l'influence de la fraction volumique f_v , nous avons réalisé des essais triaxiaux sur des éprouvettes constituées de sable de Fontainebleau et d'une proportion volumique de gravier 10/20 mm variable entre 0 et 35 %. Pour toutes les éprouvettes, nous avons :

- deux indices de densité initiaux de la matrice sableuse (moyennement dense $I_D = 0,70$ ou lâche $I_D = 0,30$) ;
- trois états de contrainte de consolidation isotrope : $\sigma'_c = 50, 100$ et 400 kPa ;
- une fraction volumique f_v des inclusions de 0, 12, 20 et 35 %.

Ensuite, nous avons étudié ce paramètre sur deux autres sols grossiers, un contient du sable de Fontainebleau avec des graviers 30/60 mm, sous une contrainte de confinement 100 kPa d'une part et 400 kPa d'autre part, et l'autre contient du sable de Fontainebleau avec des graviers 8/10 mm sous une contrainte de confinement de 100 kPa.

b) Etude de la taille des inclusions

Nous avons réalisé des essais en changeant uniquement la taille des inclusions (d_{\max} : diamètre maximal des inclusions) de façon à garder le même étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} . Les tailles des inclusions utilisées sont G10/20 mm ($d_{\min} = 10$ mm et $d_{\max} = 20$ mm) et G30/60 mm ($d_{\min} = 30$ mm et $d_{\max} = 60$ mm).

c) Etude de l'étalement de la courbe granulométrique

Dans l'étude de l'étalement, nous avons réalisé des essais en changeant l'étalement de la courbe granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} : 30/60, 10/60 et 4/60 mm.

2- Etude de l'influence de l'indice de compacité de la matrice

Nous avons réalisé des essais sur deux indices de densité différents : $I_D = 0,30$ et $0,70$.

Le Tableau III. 1 récapitule les données du programme expérimental réalisé à l'aide de l'appareil triaxial Ø300 mm.

N° Essai	Type	Matériaux		f _v (%)	σ' _c (kPa)	I _D
		Matrice ⁽¹⁾	Type d'inclusion			
T01	Sec	FB	-	0	100	0,7
T02	Sec	FB	-	0	100	0,7
T03	Saturé	FB	-	0	100	0,7
T06	Sec	FB	-	0	400	0,7
T07	Sec	FB	Graviers 8/10 mm	35	100	0,7
T08	Sec	FB	Graviers 8/20 mm	35	100	0,7
T13	Saturé	FB	Graviers 8/10 mm	20	100	0,7
T14	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	100	0,7
T15	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	50	0,7
T17	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	400	0,7
T18	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	50	0,7
T19	Sec	FB	Graviers 10/20 mm	35	50	0,7
T20	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	400	0,7
T21	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,7
T22	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	400	0,7
T23	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,7
T24	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,7
T25	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	100	0,7
T26	Saturé	FB	Graviers 30/60 mm	12	100	0,7
T27	Saturé	FB	Graviers 30/60 mm	20	100	0,7
T28	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	400	0,7
T29	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	400	0,7
T30	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,7
T31	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,7
T32	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,7
T33	Saturé	FB	Graviers 30/60 mm	35	100	0,7
T34	Saturé	FB	Graviers 30/60 mm	12	400	0,7
T35	Saturé	FB	Graviers 30/60 mm	20	400	0,7
T36	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	100	0,7
T37	Saturé	FB	Graviers 10/60 mm	20	100	0,7
T38	Saturé	FB	Graviers 10/60 mm	35	100	0,7
T39	Saturé	FB	Graviers 10/60 mm	20	400	0,7
T40	Saturé	FB	Graviers 10/60 mm	35	400	0,7
T41	Saturé	FB	Graviers 4/60 mm	20	100	0,7
T42	Saturé	FB	Graviers 4/60 mm	35	100	0,7
T43	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	100	0,3
T44	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,3
T45	Saturé	FB	-	0	100	0,3
T46	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	100	0,3
T47	Saturé	FB	Graviers 30/60 mm	20	100	0,3
T48	Saturé	FB	-	0	100	0,3
T49	Saturé	FB	Graviers 4/60 mm	20	100	0,3
T50	Saturé	FB	-	0	50	0,3
T51	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	100	0,3
T52	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	50	0,7
T53	Saturé	FB	-	0	400	0,7
T54	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	35	400	0,7
T55	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	400	0,7
T56	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	400	0,7
T57	Saturé	FB	Graviers 10/60 mm	35	100	0,7
T59	Saturé	FB	Graviers 10/60 mm	35	100	0,3
T60	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	12	50	0,7
T61	Saturé	FB	Graviers 10/20 mm	20	50	0,7

(1) FB: Sable de Fontainebleau

Tableau III. 1: Programme expérimental réalisé à l'aide de l'appareil triaxial Ø300 mm.

III.2. Résultats typiques et essais de répétabilité

III.2.1 Résultats typiques sur le sable de Fontainebleau

Nous présentons les résultats obtenus pour l'essai typique T03 effectué sur le sable de Fontainebleau pur (la fraction volumique des inclusions $f_v = 0\%$), dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau III. 2.

Paramètre	Valeur
I_D	0,70
Matrice	Sable de Fontainebleau
σ'_c	100 kPa

Tableau III. 2: Paramètres de l'essai typique présenté

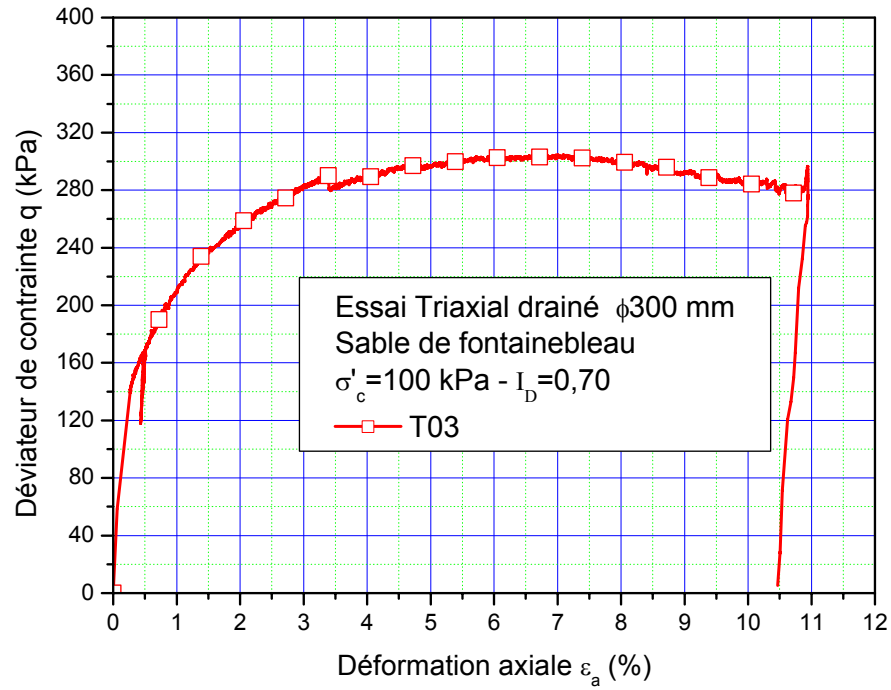
Les courbes expérimentales sont présentées sur la Figure III. 1

a) Courbe de cisaillement

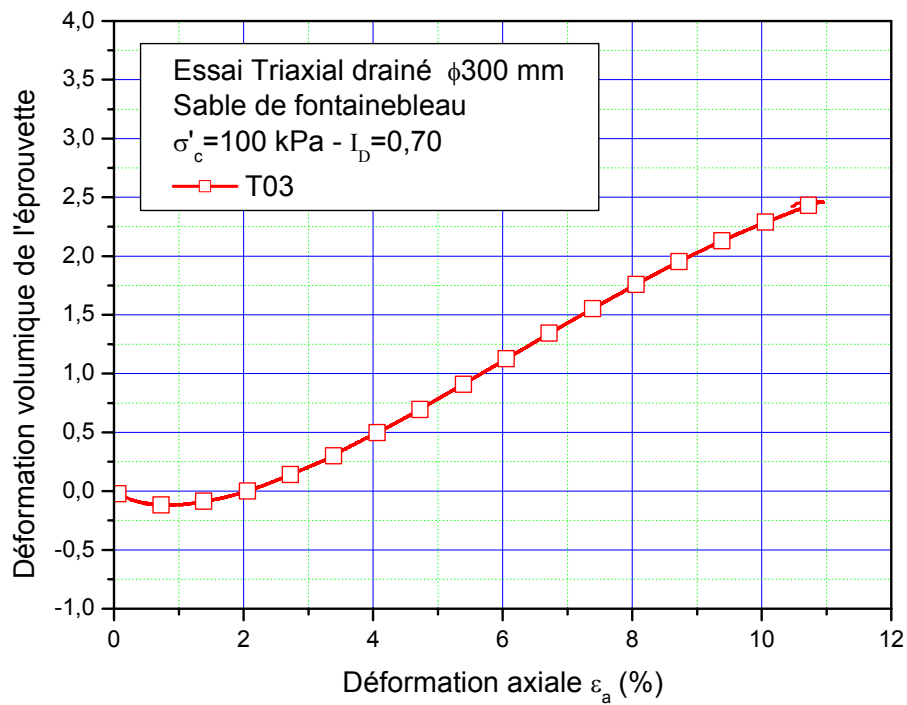
La première courbe présente le déviateur de contrainte q en fonction de la déformation axiale ε_a . On observe que le déviateur augmente initialement de façon quasi-linéaire ; c'est la phase élastique, suivie de la phase d'écrouissage, où q passe par une valeur maximale (ici à peu près 300 kPa). Cette dernière correspond à la rupture initiale de l'éprouvette (pic de résistance), pour une déformation axiale de l'ordre de 7 %, suivie d'un radoucissement.

b) Courbe de déformation volumique

Il s'agit de la seconde courbe représentant la déformation volumique $-\varepsilon_v$ en fonction de la déformation axiale ε_a . Au début du chargement, le volume de l'échantillon diminue : les grains de sable s'enchevêtrent. C'est bien ce que l'on observe sur la courbe pour de faibles déformations axiales, avec une déformation volumique ε_v positive. Nous sommes dans la phase de contractance. Puis le sens de variation du volume s'inverse, ce qui correspond, au niveau microscopique, au désenchevêtrement des grains. C'est la phase de dilatance. Le point de changement de comportement ($\varepsilon_v = 0$) correspond à l'état caractéristique.



(a)



(b)

Figure III. 1: Sable de Fontainebleau moyennement dense ($I_D = 0,70$) : (a) courbe de cisaillement ; (b) courbe de déformation volumique

III.2.2 Répétabilité des essais

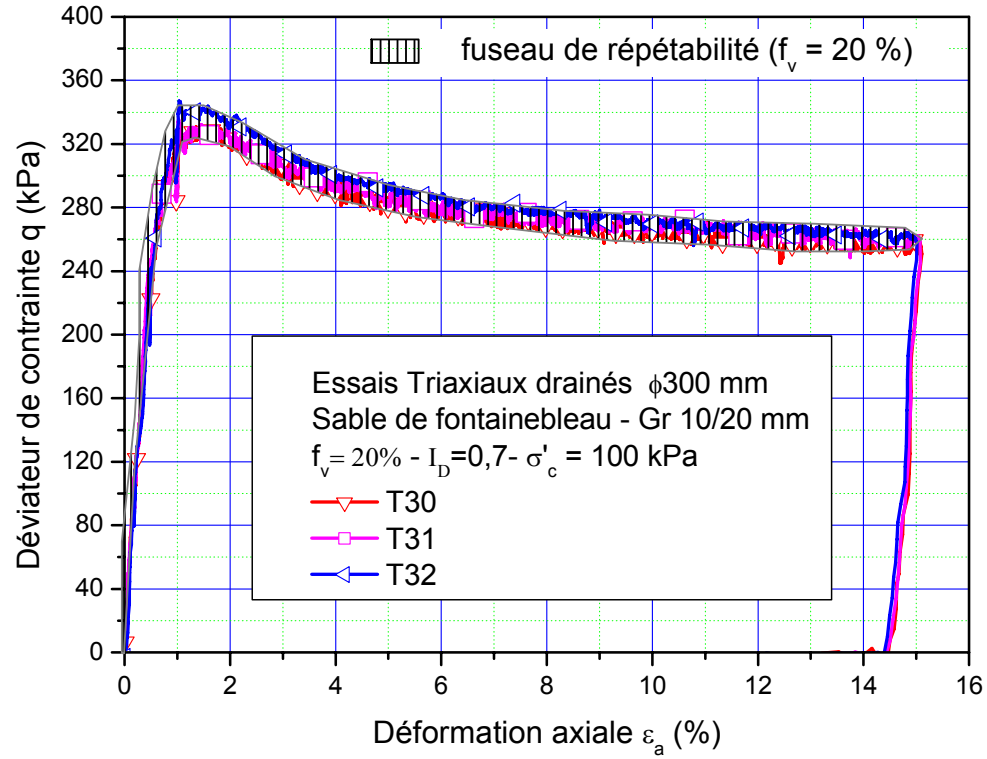
Dans le but de s'assurer que la procédure expérimentale est validée et les résultats expérimentaux sont significatifs, il est important de vérifier la répétabilité en réalisant plusieurs essais sur des éprouvettes réputées être dans les mêmes conditions initiales.

Dans ce but, nous avons réalisé trois essais drainés sur des mélanges de sable de Fontainebleau avec 20% de graviers 10/20 mm.

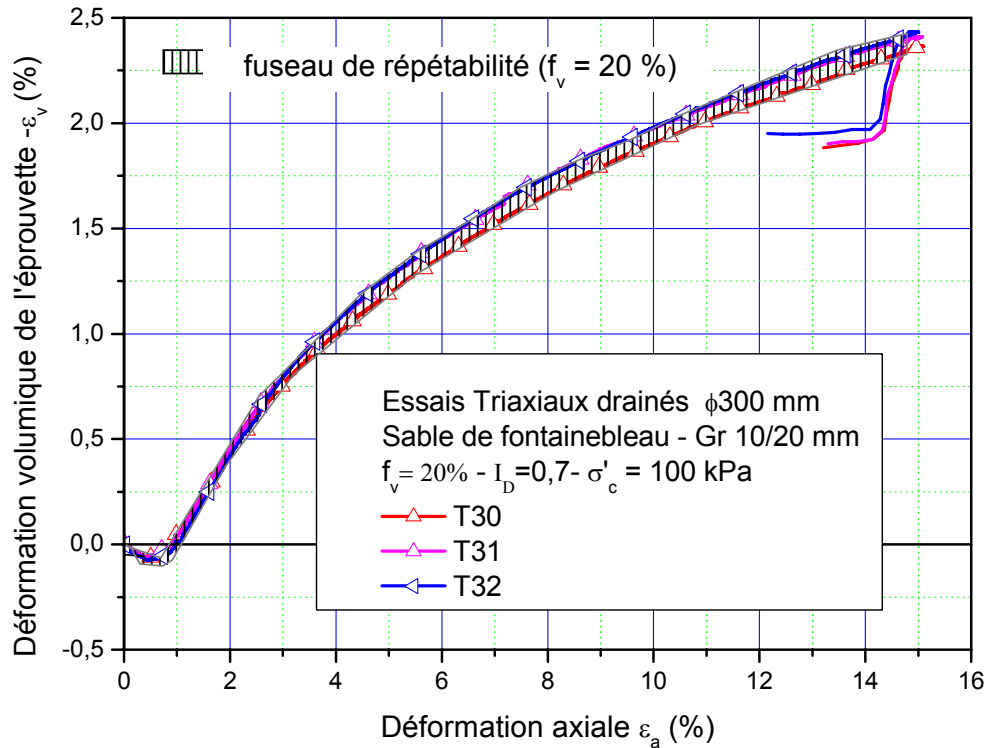
La Figure III. 2 montre qu'on a une bonne répétabilité en termes de résistance au cisaillement et en termes de variation de volume. Cela confirme que la procédure expérimentale est répétable. L'incertitude sur la valeur du déviateur au pic $\Delta q/q_{\text{moy}}$ vaut environ 3.6% et sur la, valeur de la déformation volumique, elle vaut 3.5%.

A partir de ces essais, on définit le fuseau de répétabilité (l'enveloppe des courbes correspondant à ces essais). Ce fuseau pour $f_v = 20 \%$ sera utilisé par la suite et permettra de conclure sur l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement des sols grossiers étudiés.

La Figure III. 3 présente deux essais de répétabilité réalisés sur le sable de Fontainebleau seul, sous une contrainte de confinement de 100 kPa et avec un indice de densité de 0,70, à l'aide de l'appareil Ø 300 mm. On constate également une très bonne répétabilité. Donc, la procédure expérimentale est validée pour le sable pure, et les mélanges (sable + inclusions) à l'appareil triaxial Ø 300 mm.



(a)



(b)

Figure III. 2: Essais de répétabilité sur un sol grossier de référence : (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).

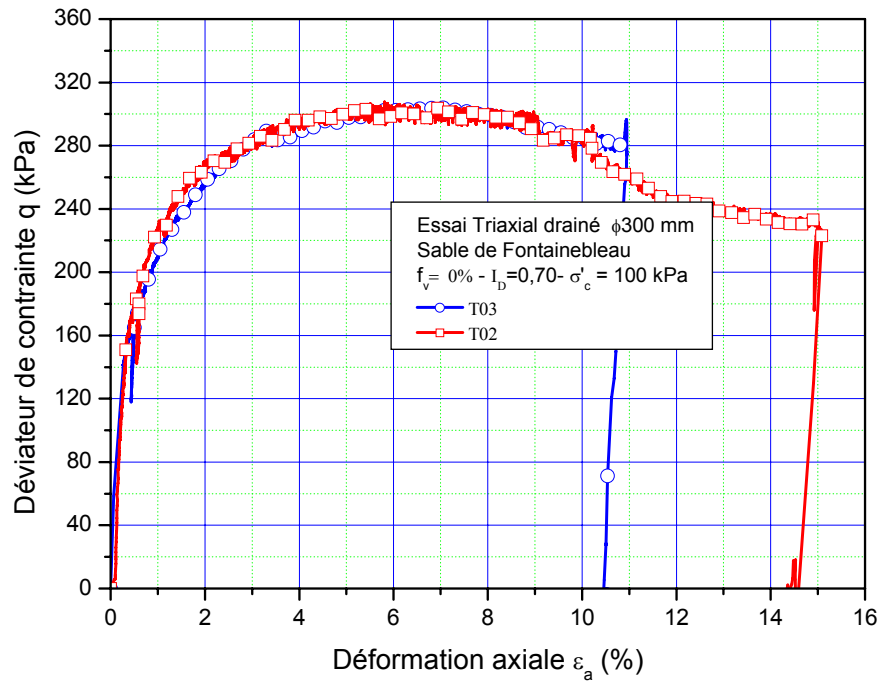


Figure III. 3: Essais de répétabilité sur sable de Fontainebleau

III.3 Influence des paramètres étudiés

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats des essais sur les sols grossiers étudiés en mettant en évidence l'influence des paramètres fondamentaux sur les comportements mécaniques observés. Nous distinguons les deux états de densité de la matrice : moyennement dense et lâche.

III.3.1 Cas de la matrice moyennement dense ($I_D = 0,70$)

III.3.1.1 Influence de la fraction volumique des inclusions f_v

Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous avons réalisé une série d'essais sur des éprouvettes constituées d'une matrice de sable de Fontainebleau ($I_D = 0,70$) avec une proportion volumique f_v de graviers 10/20 mm variant de 0 à 35 % (Tableau III. 3).

Matériaux					
N° Essai	Matrice ¹	Type d'inclusions	f_v (%)	σ'_c (kPa)	I_D
T60	FB	Graviers 10/20 mm	12	50	0,70
T61			20		
T52			35		
T03	FB	Graviers 10/20 mm	0	100	0,70
T25			12		
T30, T31, T32			20		
T36			35		
T06 (sec)	FB	Graviers 10/20 mm	0	400	0,70
T28			12		
T29			20		
T20			35		
T03	FB	Graviers 30/60 mm	0	100	0,70
T26			12		
T27			20		
T33			35		
T06 (sec)	FB	Graviers 30/60 mm	0	400	0,70
T34			12		
T35			20		
T03	FB	Graviers 8/10 mm	0	100	0,70
T13			20		
T07 (sec)			35		

(1) FB : Sable de Fontainebleau

Tableau III. 3: Caractéristiques des essais mettant en évidence l'influence de la fraction volumique des inclusions

Sur la Figure III. 4, nous présentons les courbes de cisaillement obtenues pour les sols de référence, qui contiennent des graviers 10/20 mm, à différentes fractions volumiques f_v étudiées.

On observe que le déviateur à la rupture augmente avec l'augmentation de la fraction volumique f_v des inclusions (Figure III. 4a). Il est intéressant de remarquer que, par rapport au comportement de la matrice seule, l'ajout d'inclusions change la rhéologie du matériau et l'on passe d'un comportement de type « ductile » pour la matrice (rupture à q_{\max} obtenue pour une déformation axiale de l'ordre de 7%) à un comportement du type « fragile » pour le sol composite, le caractère fragile, avec un maximum de résistance obtenu pour une déformation faible (inférieure à 2% dans tous les cas) et le radoucissement étant d'autant plus prononcé que la fraction d'inclusions est élevée.

Il est aussi intéressant d'observer que, pour les grandes déformations, on atteint des valeurs ultimes de résistance comparables pour la matrice et pour le sol grossier, montrant que c'est alors essentiellement la matrice qui contrôle les mécanismes de déformation.

En termes de déformations volumiques, on observe sur la Figure III. 4b, que l'augmentation de la fraction f_v des inclusions n'a pas d'influence significative sur la phase de contractance. Par contre, cette influence s'illustre lors de la phase de dilatance, de façon à ce que plus la fraction volumique d'inclusions augmente, moins le sol est dilatant.

Pour les graviers à fraction volumique $f_v \leq 35 \%$, les inclusions ne sont pas en contact (Pedro, 2004), donc l'augmentation de la résistance au cisaillement est due essentiellement à la présence des inclusions rigides dans le sol, qui jouent ainsi un rôle de renforcement.

On peut tirer les mêmes conclusions pour les essais réalisés sur le mélange de sable de Fontainebleau avec des graviers 30/60 mm (Figure III. 5) et avec des graviers 8/10 mm (Figure III. 6).

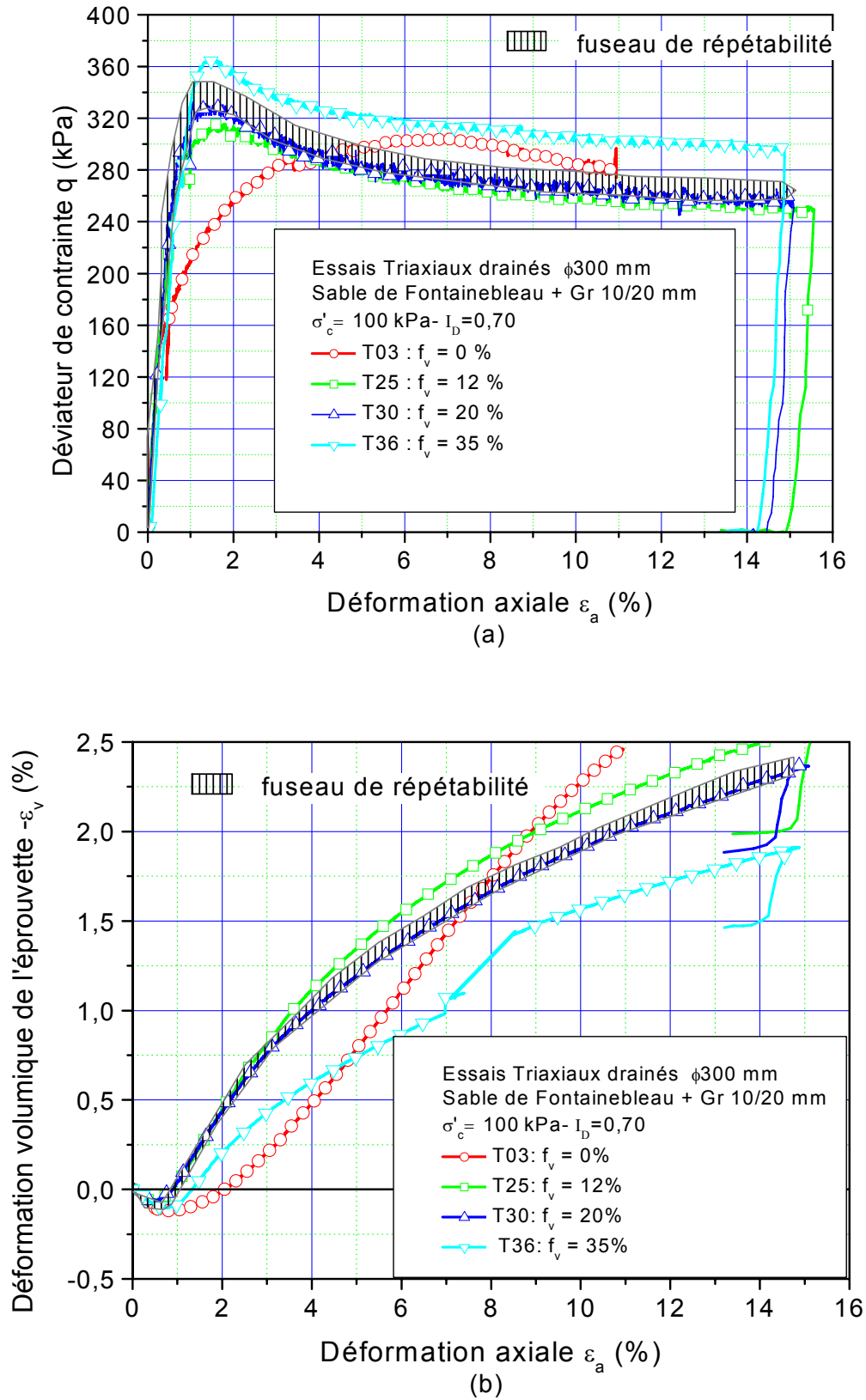
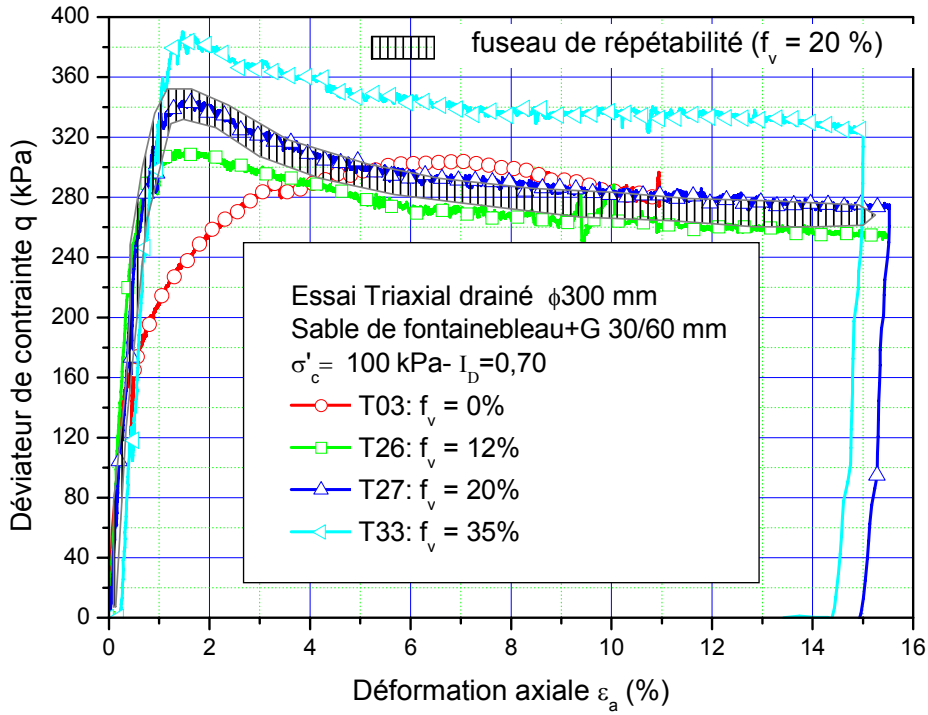
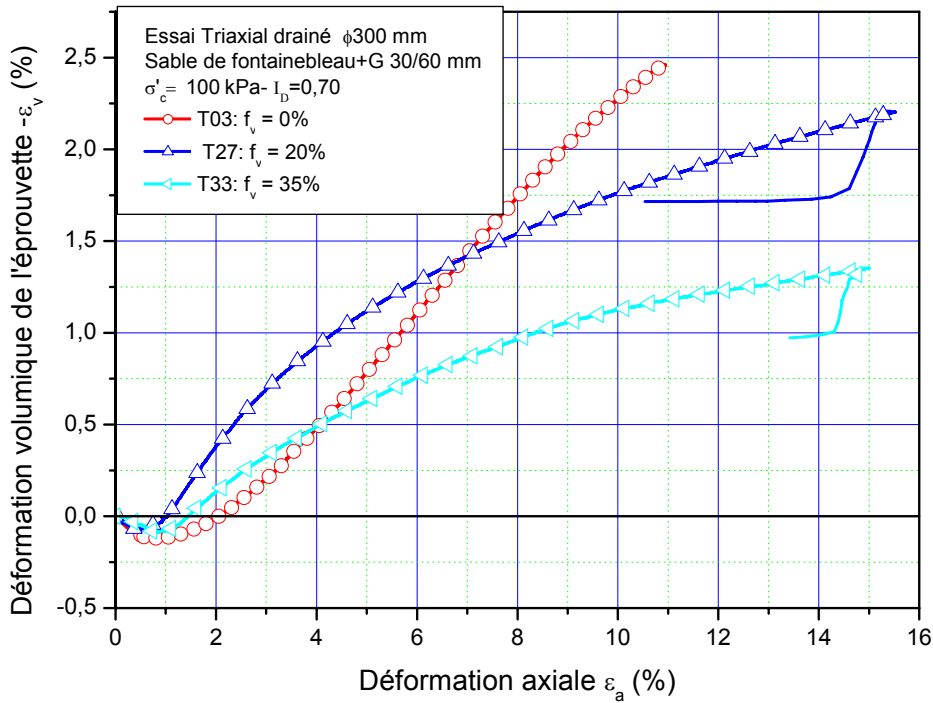


Figure III. 4: Influence de la proportion volumique de graviers f_v : (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).



(a)



(b)

Figure III. 5: Influence de la proportion volumique f_v de graviers 30/60 mm : (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).

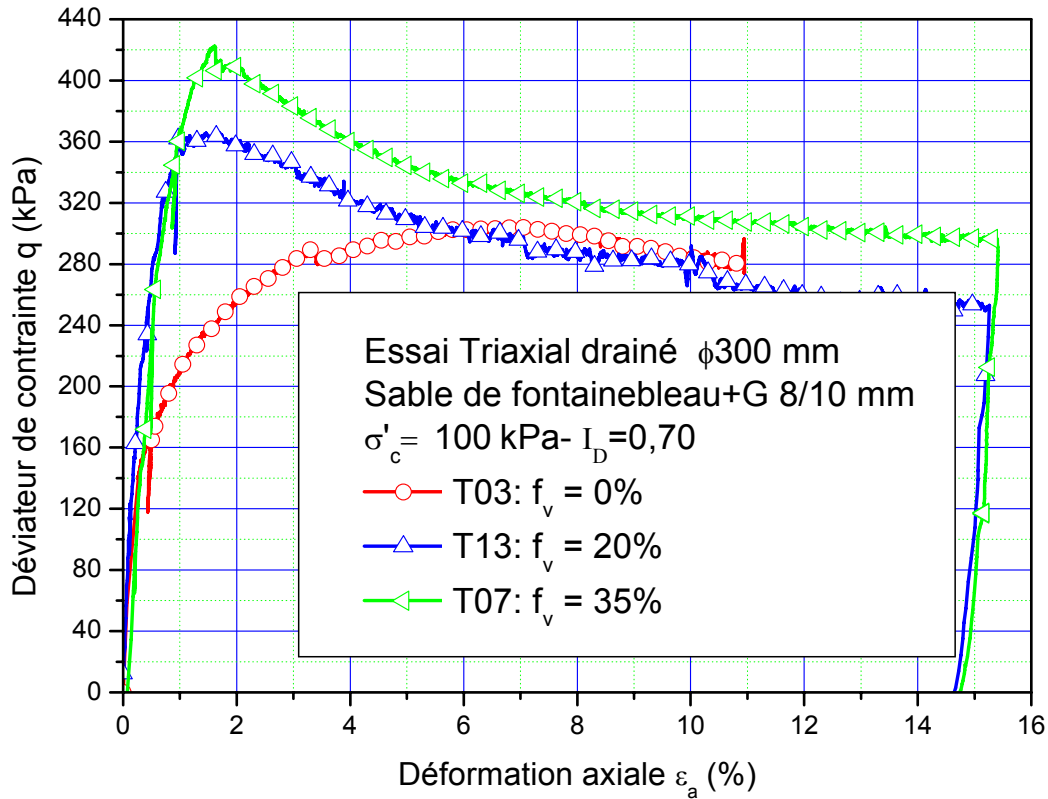


Figure III. 6 : Influence de la proportion volumique f_v de graviers 8/10 mm : courbes de cisaillement (q , ε_a).

Ce résultat peut être expliqué par le fait que la surface de contact entre les inclusions augmente avec leur fraction volumique f_v (Figure III. 7) : plus la fraction volumique des inclusions est importante (par exemple $f_v = 35\%$) plus le contact entre graviers (inclusions-inclusions) est important, ce qui crée pendant l'essai une surface plus résistante au cisaillement. En revanche, quand la fraction volumique des inclusions est faible (12 % ou 0 %), le contact entre grains est plutôt assuré par les fines et par les graviers ce qui diminue, par conséquent, la surface de la résistance au cisaillement (qui est assurée par le contact gravier-gravier).

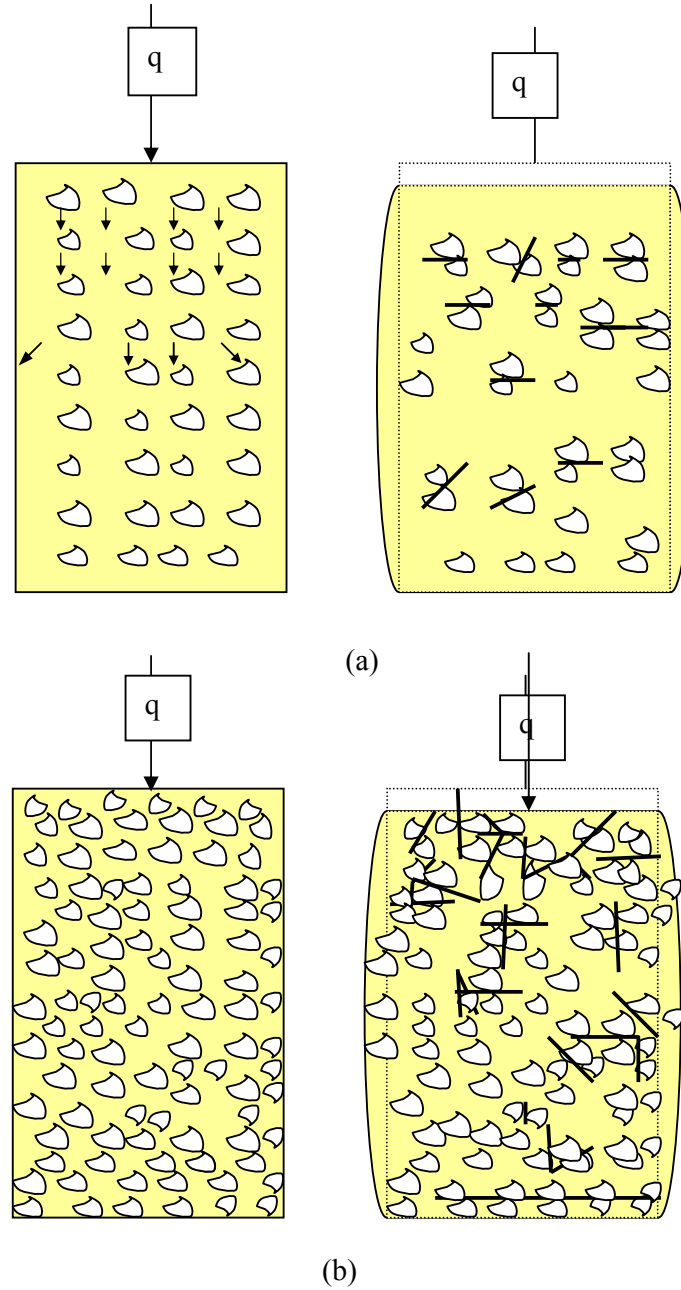


Figure III. 7 : Surfaces de contact entre les grains pendant l'essai triaxial : (a) $f_v = 12\%$; (b) $f_v = 35\%$

III.3.1.2. Influence de la taille des inclusions

Pour étudier l'influence de ce paramètre, nous avons réalisé une série d'essais triaxiaux sur des éprouvettes avec les mêmes conditions initiales (f_v , I_D et σ'_c), mais en faisant varier la taille des graviers. Nous avons utilisé les deux distributions granulométriques suivantes : 10/20 mm et 30/60 mm (Figure III. 8).



Figure III. 8: Vue des graviers utilisés dans l'étude relative à la taille des inclusions : (a) graviers 10/20 mm ; (b) graviers 30/60 mm.

Le Tableau III. 4 présente les caractéristiques des essais réalisés pour l'étude de l'influence de la taille des inclusions.

N° Essai	Matériaux		f_v (%)	σ'_c (kPa)	I_D
	Matrice ¹	Type d'inclusions			
T25	FB	G10/20 mm	12	100	0,7
T26	FB	G30/60 mm			
T28	FB	G10/20 mm	12	400	0,7
T34	FB	G30/60 mm			
T30, T31, T32	FB	G10/20 mm	20	100	0,7
T27	FB	G30/60 mm			
T29	FB	G10/20 mm	20	400	0,7
T35	FB	G30/60 mm			
T36	FB	G10/20 mm	35	100	0,7
T33	FB	G30/60 mm			

(1) FB : Sable de Fontainebleau

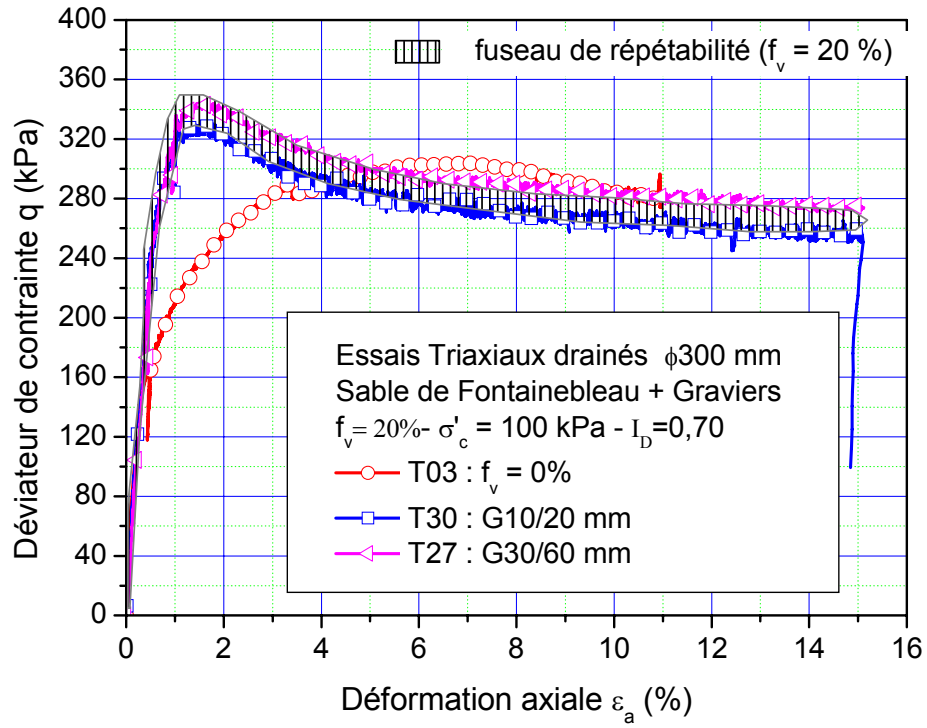
Tableau III. 4: Caractéristiques des essais mettant en évidence l'influence de la taille des inclusions

La Figure III. 9 présente deux essais réalisés pour étudier l'influence du diamètre maximal des inclusions d_{max} pour une même fraction volumique d'inclusions ($f_v = 20\%$). Pour déceler si l'effet de taille est significatif, nous avons tracé également le fuseau de répétabilité pour 20 % du gravier 10/20 mm.

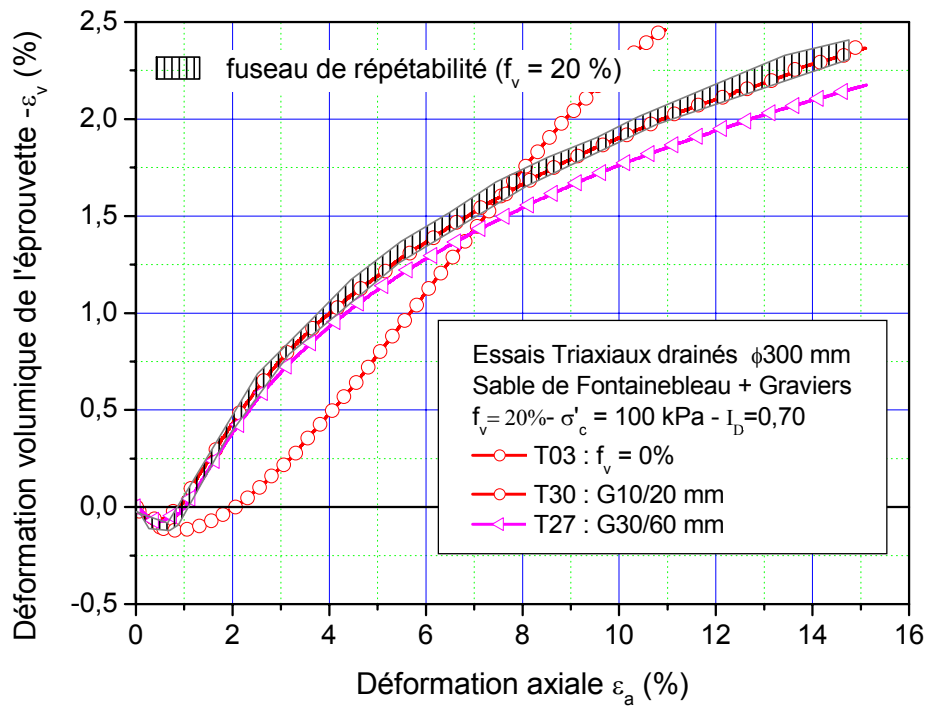
Sur la (Figure III. 9a) on remarque que la courbe de cisaillement obtenue pour le gravier 30/60 mm tombe dans le fuseau de répétabilité et cela semble indiquer que la résistance est indépendante de la taille des inclusions.

Par contre, en termes de déformation volumique, la Figure III. 9b montre que jusqu'à la rupture la taille des inclusions n'a pas d'influence, mais lors de la phase de dilatance l'essai avec les graviers 30/60 mm est au dessous du fuseau de répétabilité.

Les deux figures (Figure III. 10 et Figure III. 11) présentent la comparaison des résultats pour les fractions volumiques 12 % et 35 % respectivement. A partir de ces deux figures on retrouve les mêmes évolutions que celle obtenues pour f_v égal à 20 % (Figure III. 9), en termes de résistance au cisaillement et de déformation volumique. On peut conclure que la taille des inclusions a peu d'influence sur le comportement du matériau à la rupture pour de faible fraction volumique ($f_v = 12\%$; Figure III. 10). Une légère augmentation du déviateur au pic a été observée en augmentant la fraction volumique f_v (Figure III. 9 et Figure III. 11). Ceci peut être expliqué par le fait que la surface de contact entre graviers augmente avec l'augmentation de leur taille et de leur fraction volumique f_v (Figure III. 12). Ces résultats confirment ceux de Pedro [2004] et de Holtz et Gibbs [1956], qui ont conclu que la taille des inclusions n'a pas d'influence sur le comportement des sols grossiers. Cependant, Afriani [2003] et Jain et Gupta [1974] ont trouvé que la taille a une influence sur ce comportement. Afriani [2003] a réalisé des essais à la grande boîte de cisaillement sur les matériaux naturels de Criquebeuf-sur-Seine dont les diamètres retenus vont jusqu'à 25, 50 et 80 mm. Jain et Gupta [1974] ont réalisé des essais à l'appareil triaxial Ø100mm sur deux sols grossiers contenant des proportions identiques d'inclusions (des inclusions entre 4,8 mm et 19 mm et l'autre entre 4,8 mm et 32 mm) et ont trouvé que la résistance au cisaillement du sol à grosses inclusions a tendance à être légèrement inférieure à celle du sol contenant des petites inclusions, sans séparer l'effet de taille de l'effet de l'étalement granulométrique du sol.

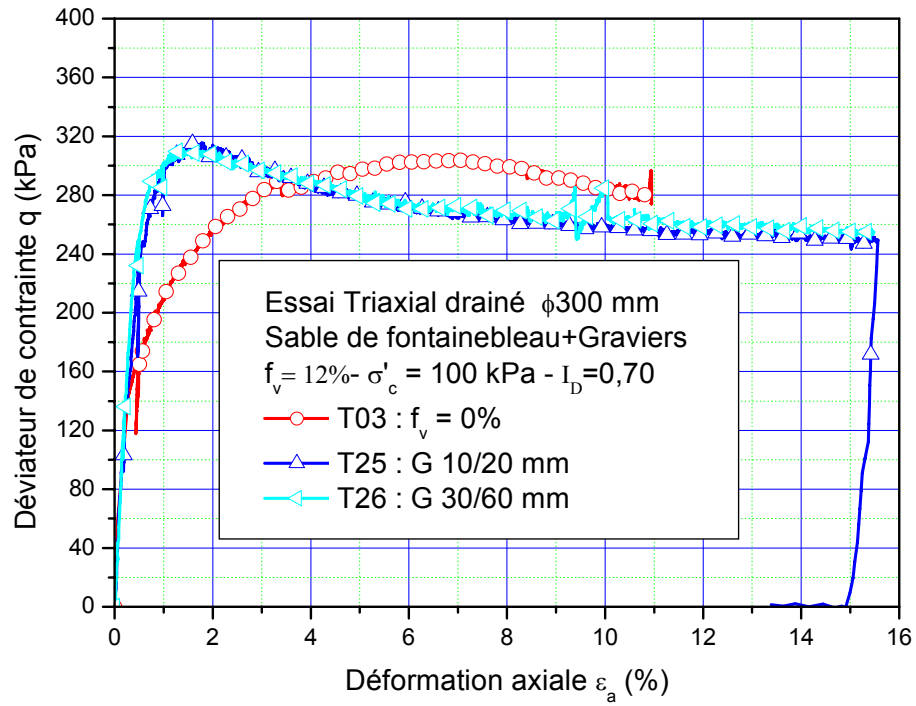


(a)

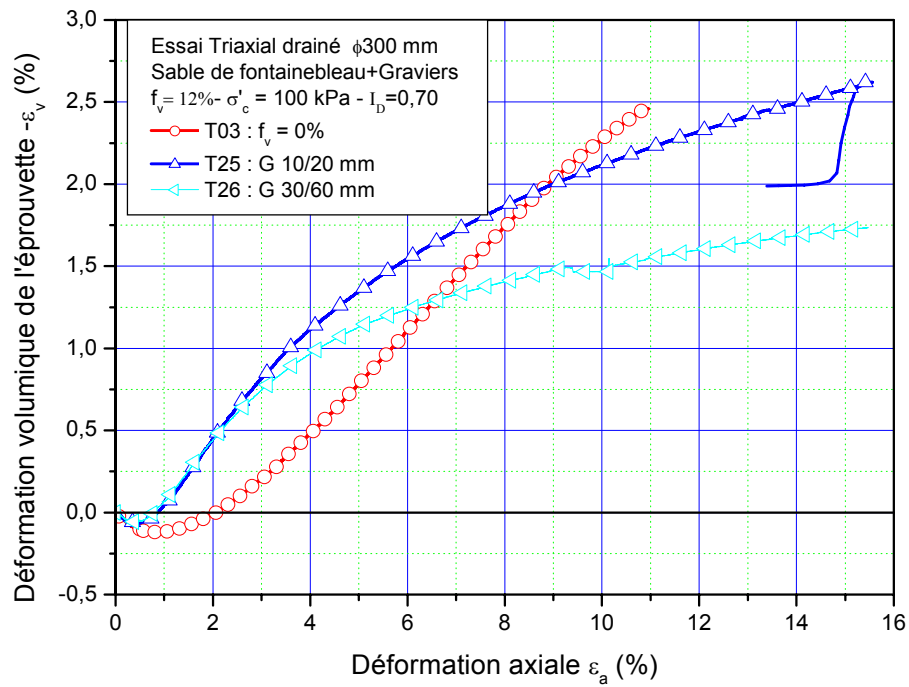


(b)

Figure III. 9: Influence de la taille des inclusions d_{max} : (a) courbes de cisaillement (q, ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique ($\varepsilon_v, \varepsilon_a$).

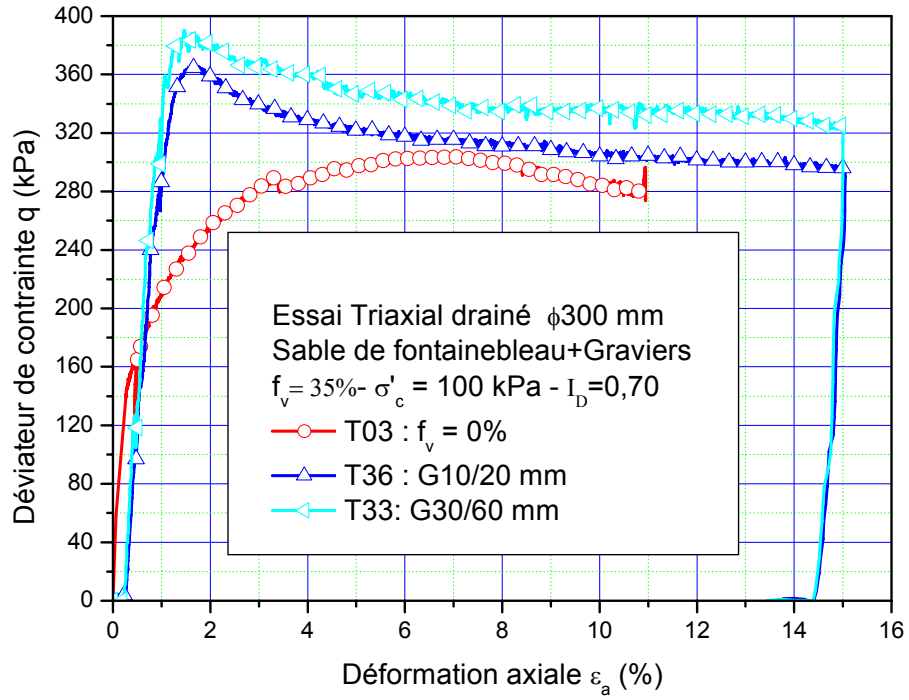


(a)

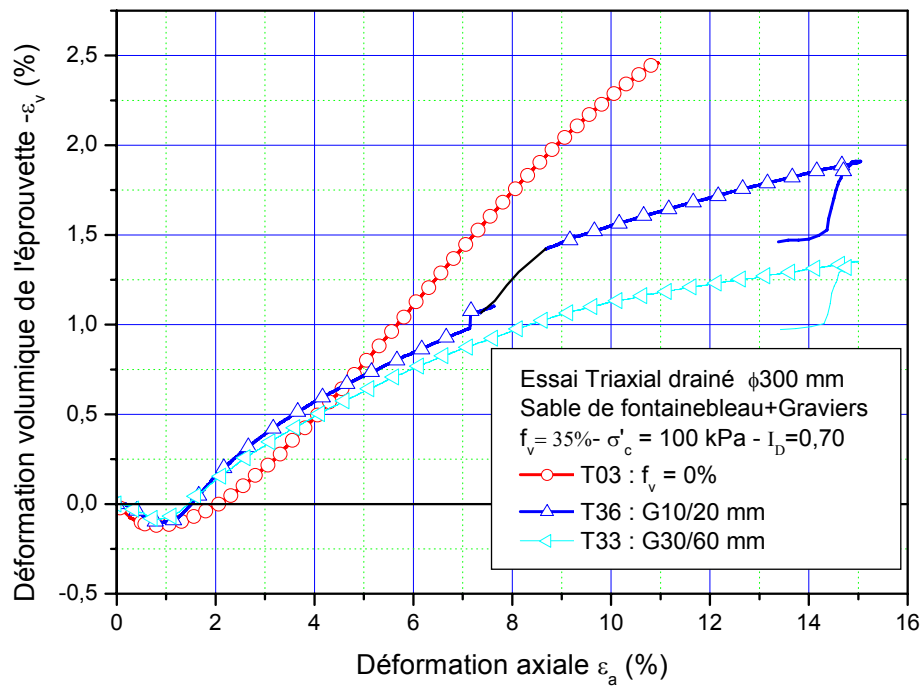


(b)

Figure III. 10: Influence de la taille des inclusions d_{max} (cas où $f_v = 12\%$) : (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).



(a)



(b)

Figure III. 11: Influence de la taille des inclusions d_{max} (cas où $f_v = 35\%$) : (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).

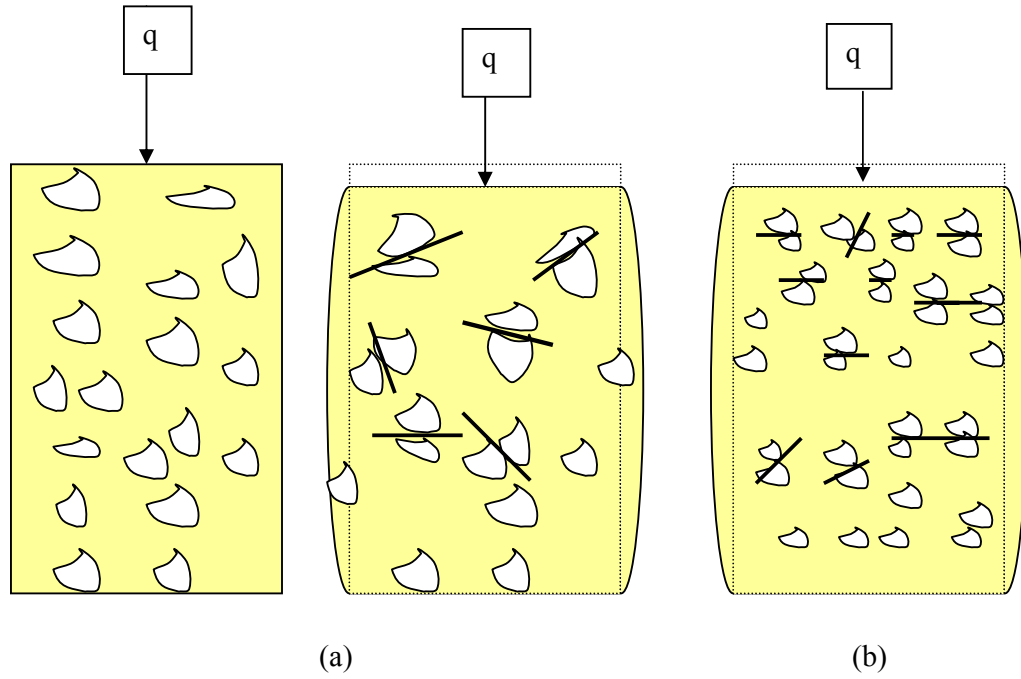


Figure III. 12 : Surfaces de contact entre les grains pendant l'essai triaxial : (a) Gr.30/60 mm ; (b) Gr.10/20 mm

III.3.1.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions

Pour étudier l'influence de ce paramètre, nous avons réalisé une série d'essais, en faisant varier l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} . Cette étude a été réalisée sur des éprouvettes contenant 20 % puis 35 % d'inclusions. Les inclusions que nous avons testées sont : graviers 8/10 mm, graviers 10/20 mm, graviers 30/60 mm, graviers 10/60 mm et graviers 4/60 mm (Figure III. 13).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 13: Vue des graviers utilisés dans l'étude de l'étalement granulométrique des inclusions d_{min}/d_{max} : (a) graviers 8/10 mm ; (b) graviers 10/20 mm ; (c) graviers 10/60 mm ; (d) graviers 4/60 mm.

Pour obtenir les courbes granulométriques étalées des inclusions nous avons réalisé les mélanges suivants :

G10/60 mm : 1/2 G10/20 mm + 1/2 G30/60 mm

G4/60 mm : 1/3 G4/10 mm + 1/3 G10/20 mm + 1/3 G30/60 mm

Cas où $f_v = 20\%$

Pour savoir si l'étalement de la courbe granulométrique a une influence sur le comportement du sol grossier, nous avons comparé les essais réalisés par rapport au fuseau de référence. Les résultats sont présentés sur la Figure III. 14.

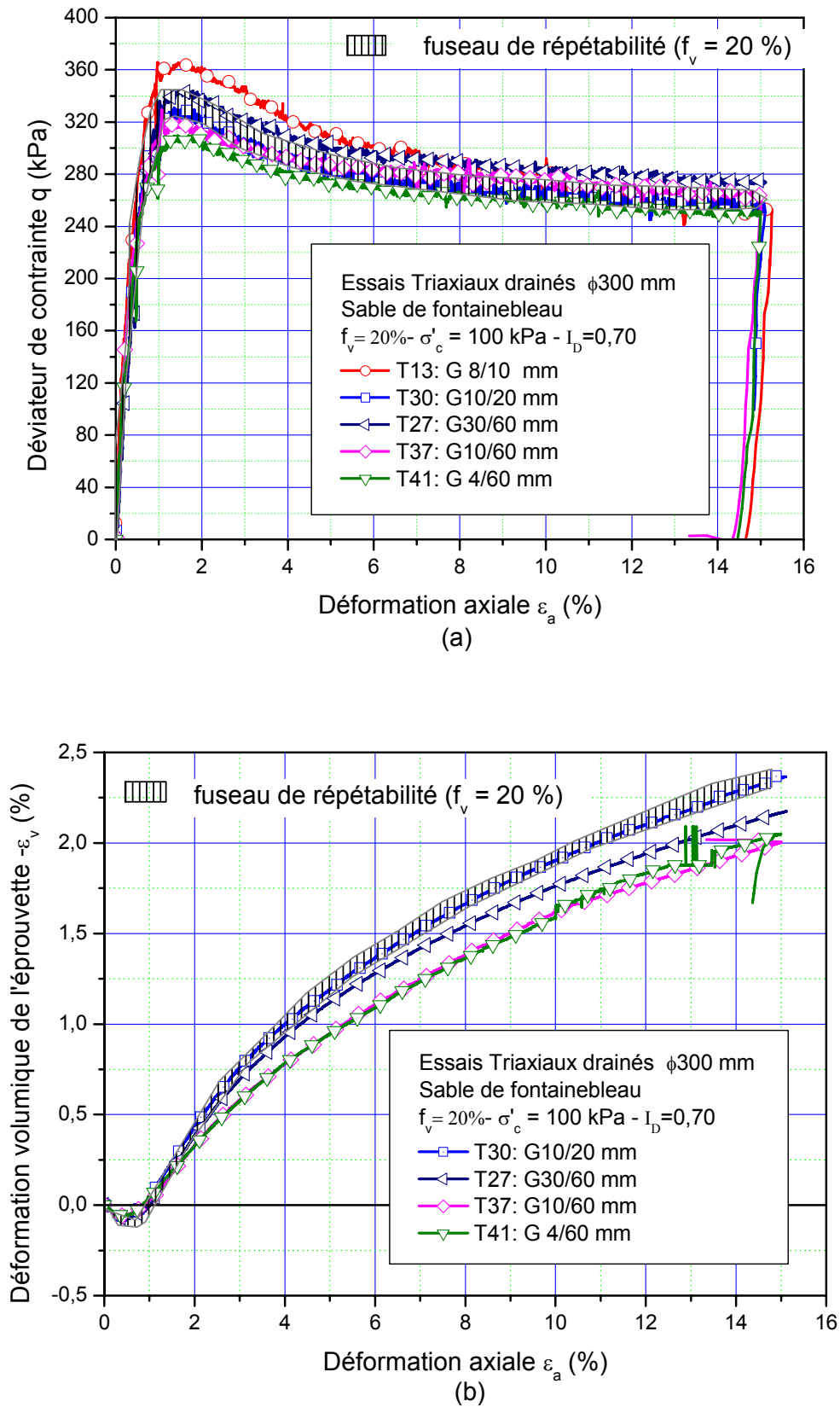


Figure III. 14: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions d_{min}/d_{max} (cas où $f_v = 20\%$) : (a) courbes de cisaillement (q, ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique ($\varepsilon_v, \varepsilon_a$).

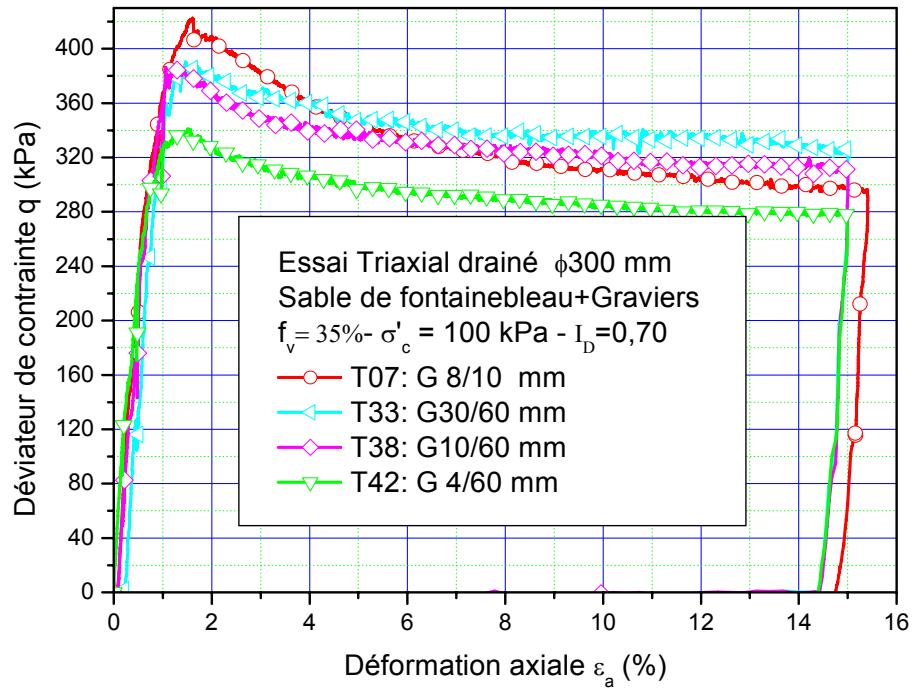
Sur la Figure III. 14a, on remarque, d'une part, que la valeur du déviateur à la rupture diminue quand on passe d'inclusions à granulométrie serrée à des inclusions à granulométrie étalée. D'autre part, sur la Figure III. 14b, on remarque que lors de la phase de contractance, l'étalement de la courbe granulométrique n'a pas d'influence significative sur les déformations volumiques ; par contre, en dilatance, on trouve que le sol est d'autant moins dilatant que la courbe granulométrique des inclusions est étalée.

Cas où $f_v = 35\%$

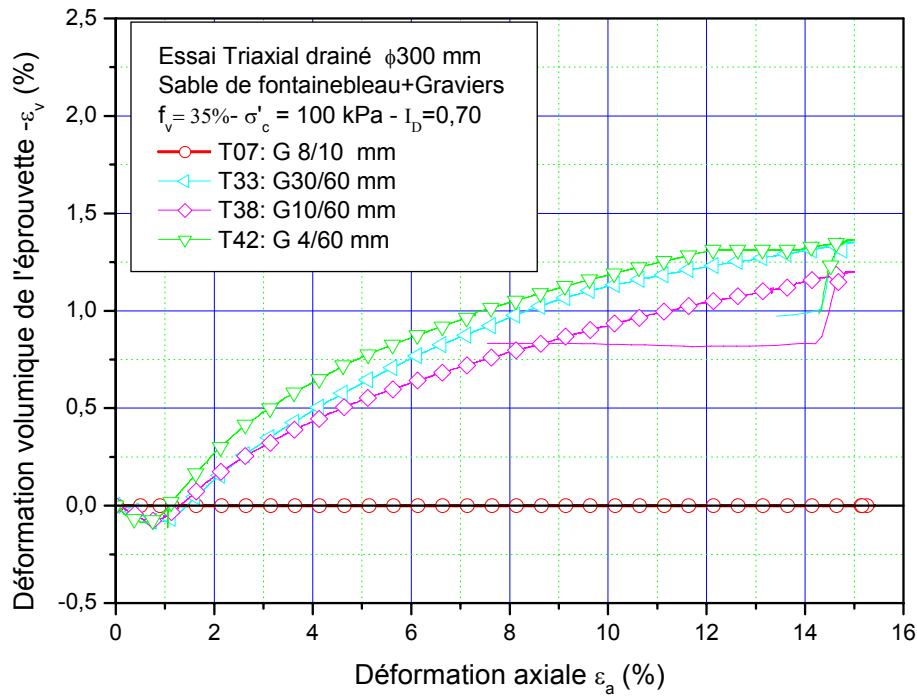
On peut faire les mêmes remarques que précédemment dans le cas où $f_v = 35\%$ (Figure III. 15).

L'ensemble des résultats obtenus montre que l'étalement granulométrique influe sur le comportement du sol grossier, parce que, pour un sol serré et pour un même pourcentage de la matrice (fines), nous avons des surfaces de contact inter-graviers plus importantes que pour le sol à granulométrie étalée.

Pour conclure, pour un même état initial de la matrice (fines), un échantillon à granulométrie serrée et fraction volumique des inclusions plus importante possède une résistance au cisaillement plus importante qu'un échantillon à granulométrie étalée et avec une fraction volumique moins élevées.



(a)



(b)

Figure III. 15: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions d_{min}/d_{max} (cas où $f_v = 35\%$) : (a) courbes de cisaillement (q, ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique ($\varepsilon_v, \varepsilon_a$).

III.3.1.4 Influence du niveau de consolidation

L'effet de ce paramètre a été étudié en réalisant des séries d'essais sur un même sol grossier, en appliquant différents niveaux de contrainte de consolidation.

La première série a été faite sur un sol contenant une fraction volumique constante ($f_v = 12\%$, 20% et 35%) de graviers 10/20 mm, pour trois niveaux de confinement σ'_c : 50, 100 et 400 kPa.

La deuxième série a été réalisée avec une fraction volumique constante ($f_v = 12\%$, 20% et 35%) de graviers 30/60 mm, sous deux contraintes de confinement σ'_c : 100 et 400 kPa.

La Figure III. 16 présente les résultats correspondant aux graviers 10/20 mm, pour $f_v = 20\%$, sous les trois niveaux de contraintes : 50, 100 et 400 kPa.

Sur la Figure III. 16a, on remarque que, lorsque la contrainte de consolidation augmente, le déviateur de contrainte augmente de façon quasi proportionnelle avec σ'_c . On observe, en termes de déformation volumique, que l'augmentation de σ'_c entraîne un accroissement de la phase de contractance.

Par ailleurs, on remarque que la présence de graviers entraîne aussi un accroissement du déviateur q_{\max} . Pour savoir si cet accroissement de résistance au cisaillement est dû à la présence des graviers ou à l'augmentation de contrainte de consolidation, nous avons tracé l'accroissement de q_{\max} du mélange, normalisé par celui de la matrice seule ($\Delta q_{\max}/q_{\max, \text{mat}}$), en fonction de la fraction volumique des inclusions mises en œuvre, et paramétrée par la contrainte de consolidation σ'_c .

La Figure III. 17 présente le taux d'accroissement de q_{\max} ($\Delta q_{\max}/q_{\max, \text{mat}}$). On retrouve bien l'augmentation de résistance du mélange par rapport à la matrice, avec l'augmentation de la fraction volumique des inclusions. Par contre, cette augmentation relative ne dépend pas de la contrainte de consolidation, confirmant la proportionnalité des courbes de cisaillement par rapport à la contrainte de consolidation.

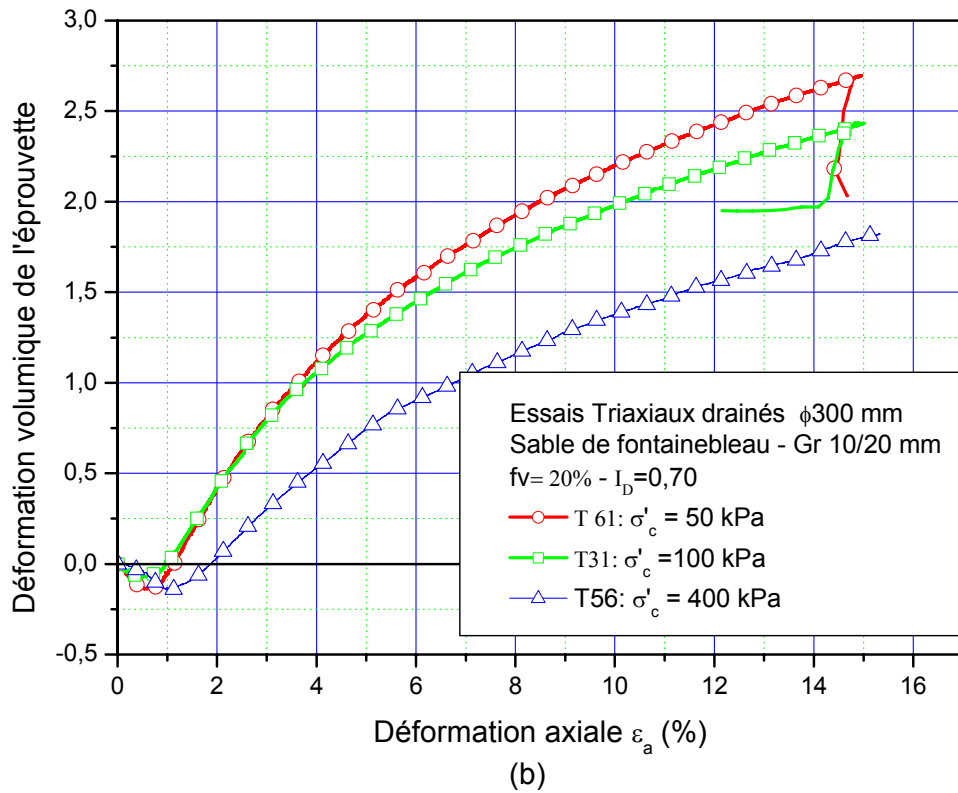
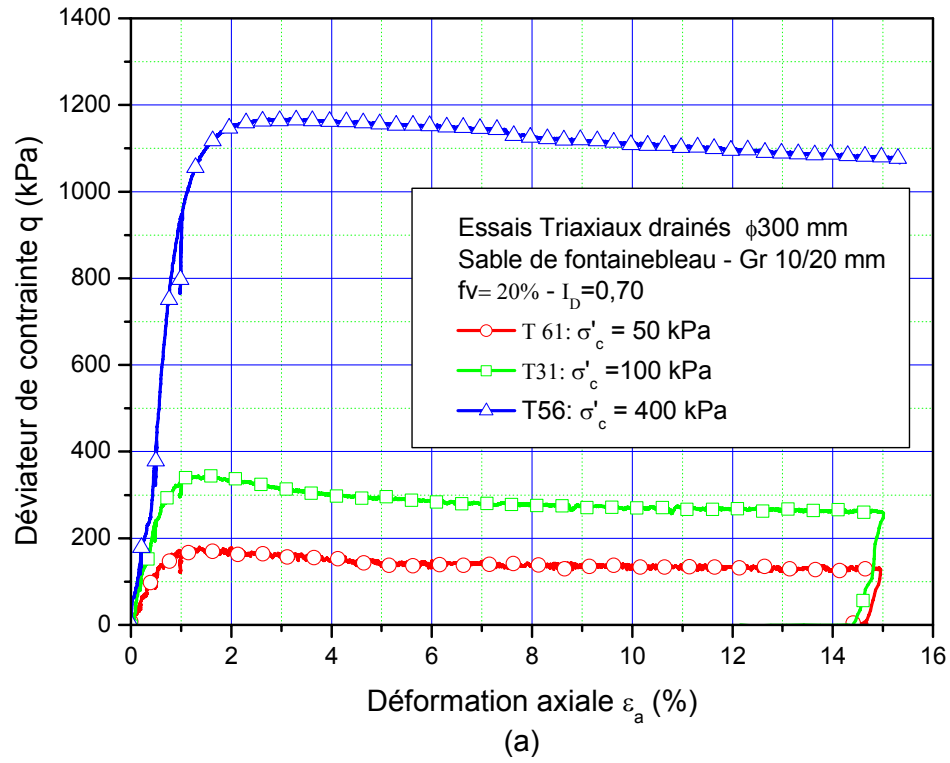
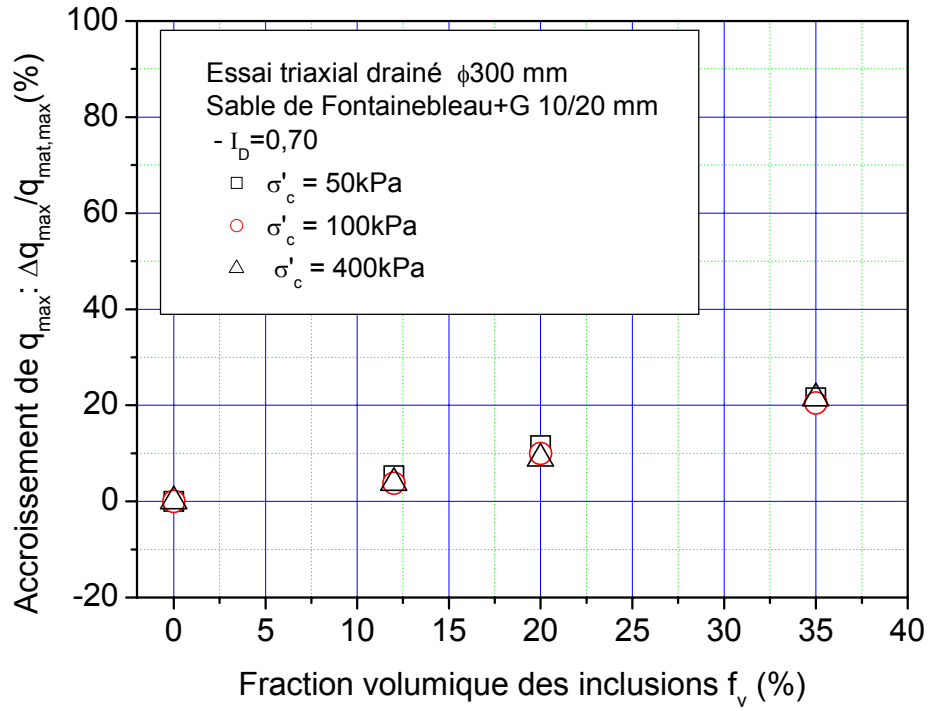
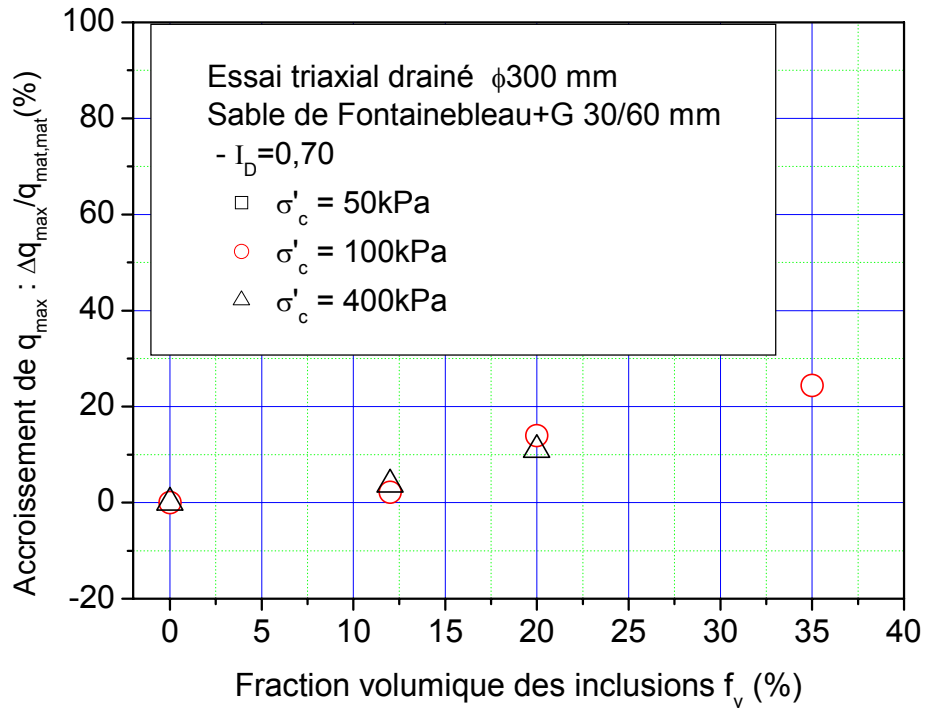


Figure III. 16: Influence de l'état de contrainte initiale des éprouvettes σ'_c : (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).



(a)



(b)

Figure III. 17 : Influence de la contrainte de consolidation isotrope σ'_c sur le taux d'accroissement de q_{\max} : (a) cas des graviers 10/20 mm ; (b) cas des graviers 30/60 mm.

III.3.1.5 Comportement à la rupture

À partir des essais réalisés nous avons cherché à évaluer les caractéristiques de rupture initiale des sols testés, au maximum de résistance au cisaillement, en utilisant le critère de Mohr-Coulomb dans le plan (τ, σ') : $\tau = \sigma' \tan \phi' + c'$.

D'après les résultats expérimentaux, nous avons constaté une cohésion faible pour toutes les configurations de sols grossiers utilisées (Figure III. 18 et Tableau III. 5). Pour cela nous avons considéré dans le calcul de l'angle de frottement interne que la cohésion était nulle.

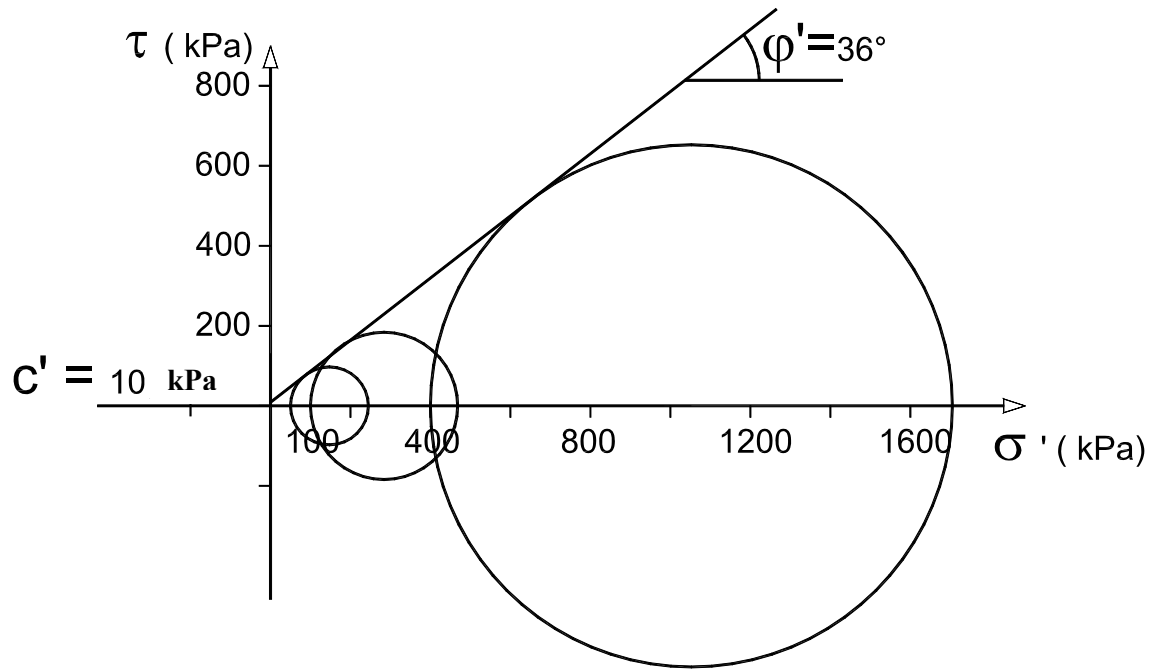


Figure III. 18: Cercles de Mohr de rupture et courbe intrinsèque pour un mélange avec des inclusions 10/20 mm et $f_v = 20 \%$

f_v (%)	c' (kPa)
0	6
12	8
20	10
35	8

Tableau III. 5 : Valeurs de la cohésion pour un mélange avec des inclusions 10/20 mm.

Nous avons tracé dans le plan (q, p') les droites de rupture pour les différentes fractions volumiques d'inclusions de 10/20 mm, (Figure III. 19).

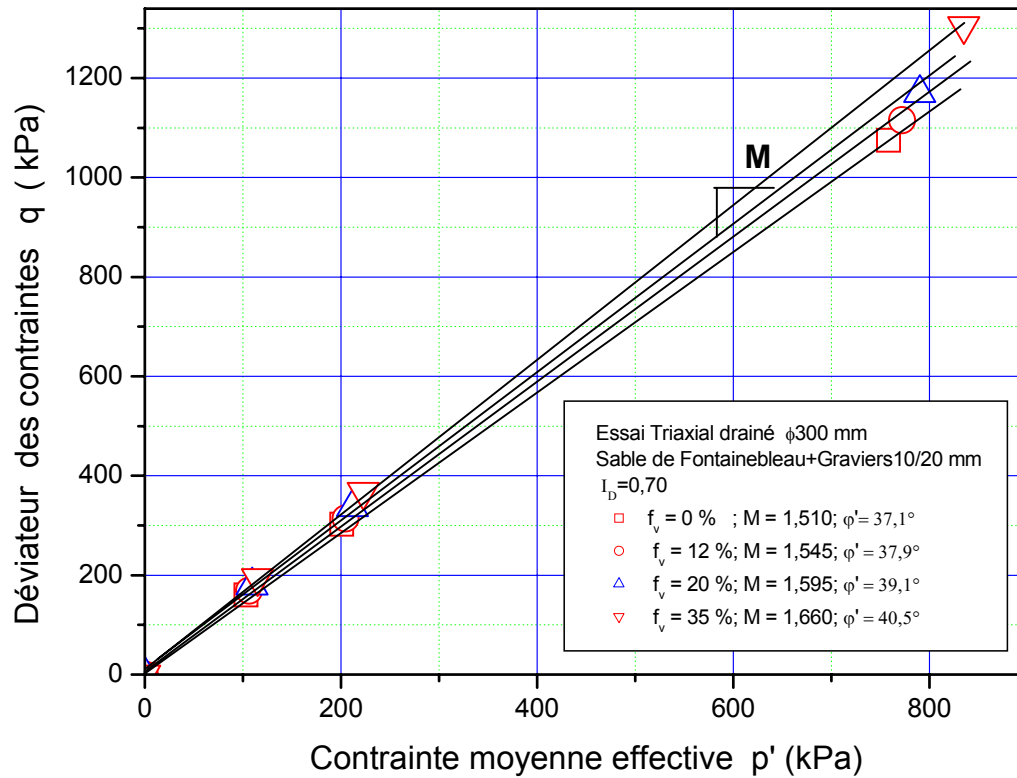


Figure III. 19: Influence de la fraction volumique de graviers sur la droite de rupture du sol grossier.

Dans notre cas, où le sol est considéré non cohérent ($c' = 0$), l'enveloppe de rupture au maximum de résistance est représentée dans le plan (q, p') par une droite, de pente M , passant par l'origine. L'angle de frottement interne de sol φ' au maximum de résistance peut être déterminé à partir de formule 3.1:

$$\varphi' = \text{Arcsin} \left[\frac{3M}{6 + M} \right] \quad (3.1)$$

Avec

$$M = \frac{q}{p'}$$

et

$$p' = \frac{1}{3}q + \sigma'_c \text{ et } q = \sigma'_1 - \sigma'_c : \text{déviateur des contraintes}$$

Le Tableau III. 6 présente les valeurs de l'angle de frottement interne en fonction de la fraction volumique des inclusions et pour les différentes tailles d'inclusions utilisées.

Inclusion	f_v (%)	0	12	20	35
G 8/10mm	M_{rup}	1,51	1,57	1,65	1,73
	ϕ' (°)	37,1	38,5	40	42,5
G10/20mm	M_{rup}	1,51	1,54	1,59	1,66
	ϕ' (°)	37,1	37,9	39,0	40,5
G30/60mm	M_{rup}	1,51	1,53	1,61	1,68
	ϕ' (°)	37,1	37,5	39,4	41,0
G10/60mm	M_{rup}	1,51	-	1,55	1,68
	ϕ' (°)	37,1	-	38,1	41,0
G 4/60mm	M_{rup}	1,51	-	1,52	1,59
	ϕ' (°)	37,1	-	37,3	38,9

Tableau III. 6: Valeurs de l'angle de frottement interne ϕ' pour le sol modèle à différentes fractions volumiques des inclusions 8/10 mm, 10/20 mm, 30/60 mm, 10/60 mm et 4/60 mm.

Les valeurs d'angle de frottement interne des différents sols en fonction de la fraction volumique d'inclusions, évaluées au pic de résistance (q_{max}), ont été reportées sur le graphe synthétique de la Figure III. 20. Cette figure permet de retrouver/synthétiser, en termes d'angle de frottement interne, les influences des différents paramètres étudiés présentées dans les parties précédentes.

On retrouve tout d'abord l'effet de renforcement du matériau apporté par les inclusions, avec un angle de frottement interne au maximum de résistance ϕ' qui augmente de manière significative avec l'augmentation de la fraction volumique d'inclusions, dans tous les cas. L'augmentation la plus significative avec f_v est trouvée dans le cas des inclusions uniformes 8/10 mm, où l'on passe d'un angle de frottement de 37,1° pour la matrice seule à un angle de frottement de l'ordre de 42,5° pour le mélange.

On retrouve aussi le fait que, pour un même étalement granulométrique des inclusions, la taille des inclusions n'a pas d'influence significative sur la valeur de ϕ' , les évolutions de ϕ' pour les inclusions 10/20 mm et 30/60 mm étant très proche.

On retrouve finalement que l'étalement granulométrique de la phase inclusionnaire (graviers 10/60 mm et 4/60 mm) a pour effet d'atténuer l'effet de renforcement de manière significative par rapport aux inclusions de taille uniforme.

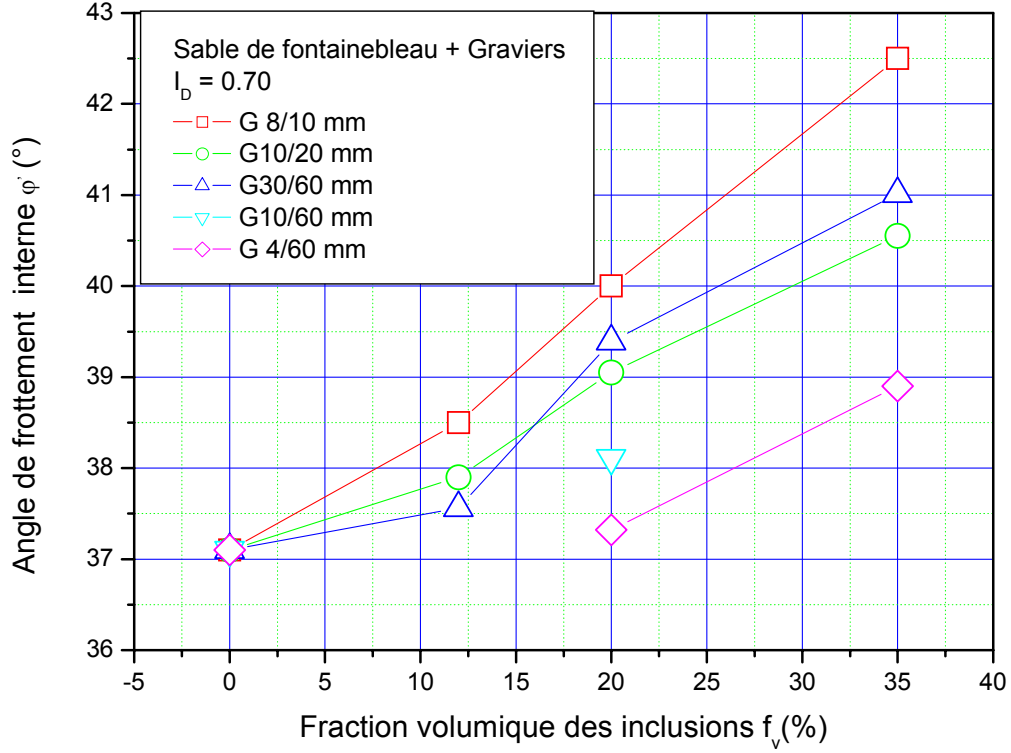


Figure III. 20: Evolution de l'angle de frottement interne ϕ' au maximum de résistance en fonction de la fraction volumique des inclusions

III.3.1.6 Notion de seuil caractéristique

Le seuil caractéristique a été défini pour les sables. Dans ce paragraphe on va vérifier si le concept reste valable pour le mélange.

L'état caractéristique correspond au seuil où le comportement volumique du sol passe de l'état de contractance à l'état de dilatance (Luong [1978], Luong [1980]). On détermine donc le déviateur à ce seuil pour les différents niveaux de contrainte, puis on trace la droite d'état caractéristique dans le plan (q, p) . On définit l'angle caractéristique, ϕ'_{car} de la façon suivante :

$$\phi'_{car} = \text{Arcsin} \left[\frac{3M_{car}}{6 + M_{car}} \right] \quad (3.2)$$

Nous présentons dans la Figure III. 21 les droites d'état caractéristique obtenues pour différentes fractions volumiques.

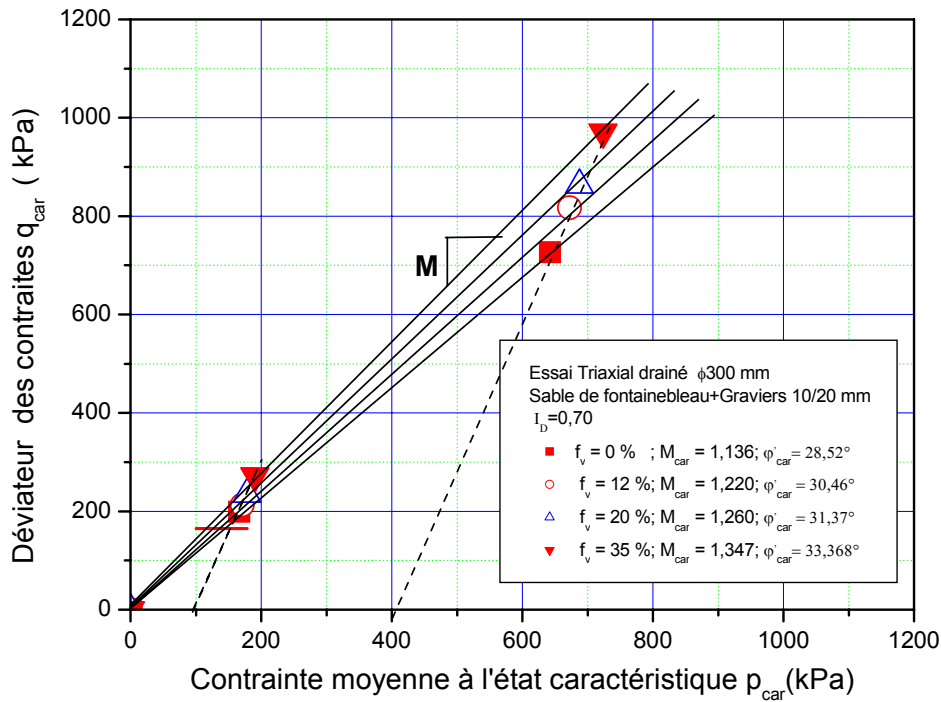


Figure III. 21: Droites d'état caractéristique obtenues pour les différentes fractions volumiques d'inclusions 10/20 mm.

Les résultats en terme d'angle caractéristique ϕ'_{car} sont répertoriés dans le Tableau III. 7.

Inclusion	f_v (%)	0	12	20	35
G10/20mm	M_{car}	1,14	1,22	1,32	1,41
	ϕ'_{car} (°)	28,5	30,4	32,8	35
G30/60mm	M_{car}	1,14	1,26	1,32	1,47
	ϕ'_{car} (°)	28,5	31,34	32,7	36,3
G10/60mm	M_{car}	1,14	-	1,31	1,4
	ϕ'_{car} (°)	28,5	-	32,5	34,6
G 4/60mm	M_{car}	1,14	-	1,31	1,37
	ϕ'_{car} (°)	28,5	-	32,5	33,8

Tableau III. 7: Influence de la fraction volumique de graviers sur l'état caractéristique du sol.

A partir du Tableau III. 7, on peut observer que l'angle de frottement caractéristique augmente avec la fraction volumique f_v . On peut aussi remarquer que, jusqu'à 20 % d'inclusions, les valeurs des paramètres caractéristiques ne changent pas avec l'étalement granulométrique et la taille des inclusions. Par contre, pour une fraction volumique f_v de

35 %, ces paramètres ont tendance à diminuer avec l'étalement des inclusions. Il semble donc, que la notion d'état caractéristique reste valable pour une fraction volumique donnée.

III.3.2 Cas de la matrice lâche ($I_D = 0,30$)

Après l'étude de l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique d'un sol grossier pour une matrice dense ($I_D = 0,70$), on étudie le cas de la matrice lâche ($I_D = 0,30$).

Le Tableau III. 8, présente les essais réalisés pour étudier l'influence des paramètres (fraction volumique f_v , taille d_{max} et étalement d_{min}/d_{max} des inclusions) sur le comportement mécanique des sols grossiers correspondant ($I_D = 0,30$).

N° Essai	Matériaux		f_v	σ'_c (kPa)	I_D
	Matrice ¹	Taille des inclusions			
T43	FB	10/20 mm	12%	100	0,30
T44	FB	10/20 mm	20%	100	0,30
T45	FB	-	0%	100	0,30
T46	FB	10/20 mm	35%	100	0,30
T47	FB	30/60 mm	20%	100	0,30
T48	FB	-	0%	100	0,30
T49	FB	4/60 mm	20%	100	0,30
T50	FB	-	0%	50	0,30
T51	FB	10/20 mm	20%	100	0,30
T59	FB	10/60 mm	35%	100	0,30

(1) FB : Sable de Fontainebleau

Tableau III. 8: Tableau des essais réalisés pour un état de matrice lâche ($I_D = 0,30$).

III.3.2.1 Influence de la fraction volumique d'inclusions f_v

Pour étudier l'influence de ce paramètre, nous avons réalisé des essais pour des valeurs de f_v de 0 % (sable sans inclusion), 12%, 20% et 35%. Un essai de répétabilité pour un sol à $f_v = 20\%$ a également été réalisé à partir duquel nous avons déterminé le fuseau de répétabilité de ce sol. Les résultats sont présentés sur la Figure III. 22.

On observe que, la valeur du déviateur q augmente régulièrement avec f_v . La fraction volumique d'inclusions a donc pour effet d'augmenter la résistance au cisaillement du matériau étudié, de manière analogue aux résultats obtenus pour la matrice dense.

En termes de déformation volumique, on trouve un comportement essentiellement contractant. Ensuite, on trouve que jusqu'à 20 %, toutes les courbes de déformation volumique tombent dans le fuseau de répétabilité et, par conséquent, on peut en déduire que la fraction volumique des inclusions n'a pas d'influence significative sur la déformation volumique. Par contre, avec l'augmentation de f_v à 35 %, la phase de contractance est réduite.

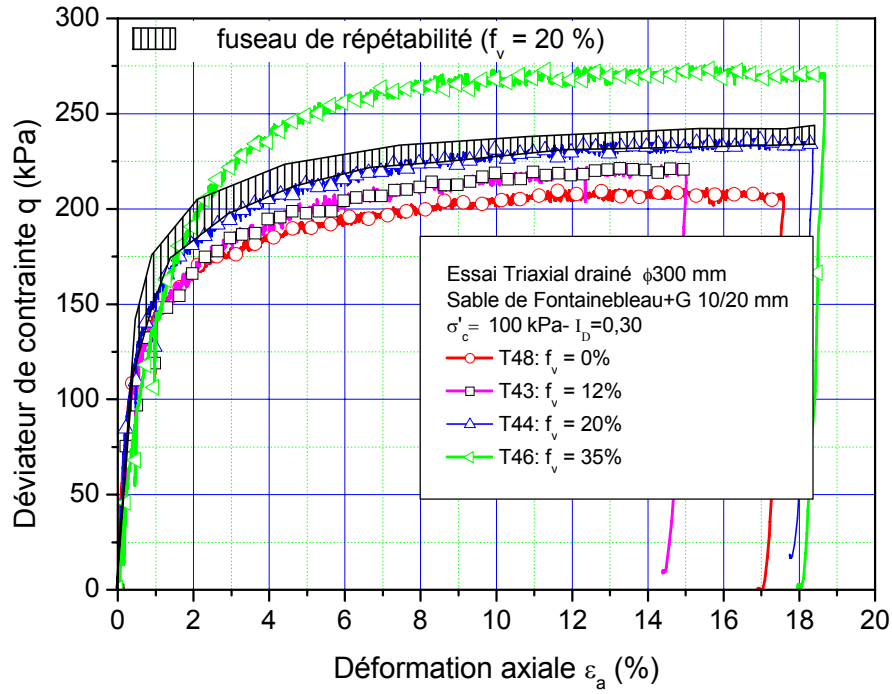
III.3.2.2 Influence de la taille des inclusions

La Figure III. 23 présente les résultats des essais réalisés pour étudier l'effet de la taille des inclusions, le fuseau de répétabilité du sol modèle à 20 % de graviers 10/20 mm et un essai réalisé sur un sol modèle contient 20 % de graviers 30/60 mm, sous une contrainte de consolidation de 100 kPa et un indice de densité de la matrice (I_D) de 30 % pour tous les essais.

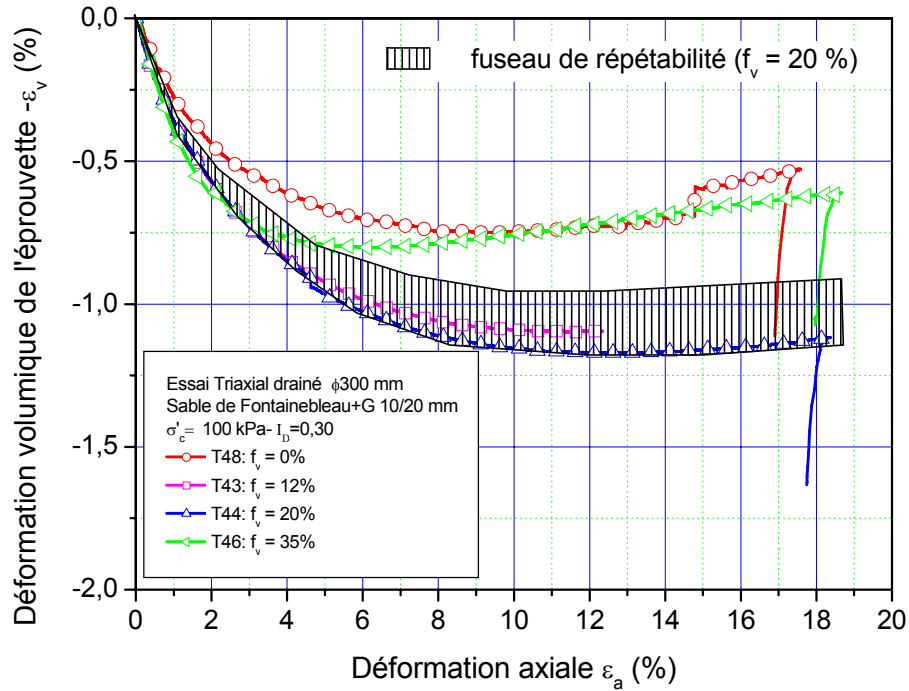
La Figure III. 23a montre que la taille des inclusions n'influe pas de manière significative sur les courbes de cisaillement. Il semble donc que la résistance au cisaillement est indépendante de la taille des inclusions. Les mêmes résultats ont été trouvés dans le cas d'une matrice dense. On constate également que le matériau qui contient des inclusions de taille plus petite est plus contractant que celui qui contient des inclusions de grosse taille (Figure III. 23b).

III.3.2.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions

La Figure III. 24a montre que la résistance au cisaillement augmente avec la diminution de l'étalement granulométrique des inclusions d_{min}/d_{max} . Ces résultats sont analogues à ceux obtenus sur la matrice dense. Par ailleurs, on constate, à partir de la Figure III. 24b, que le sol qui contient des inclusions plus étalées est plus contractant que celui qui contient des inclusions serrées.

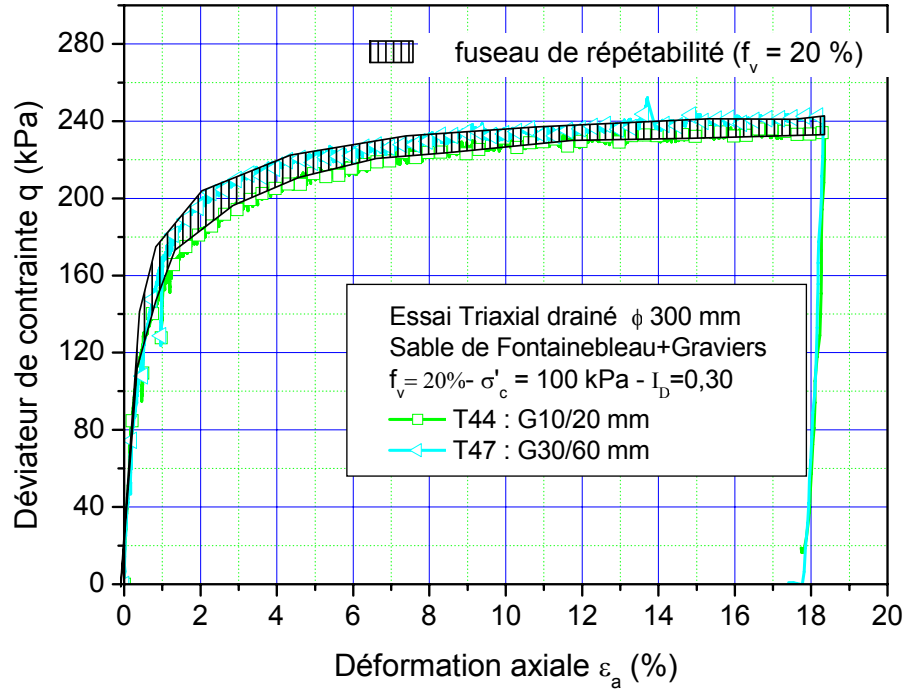


(a)

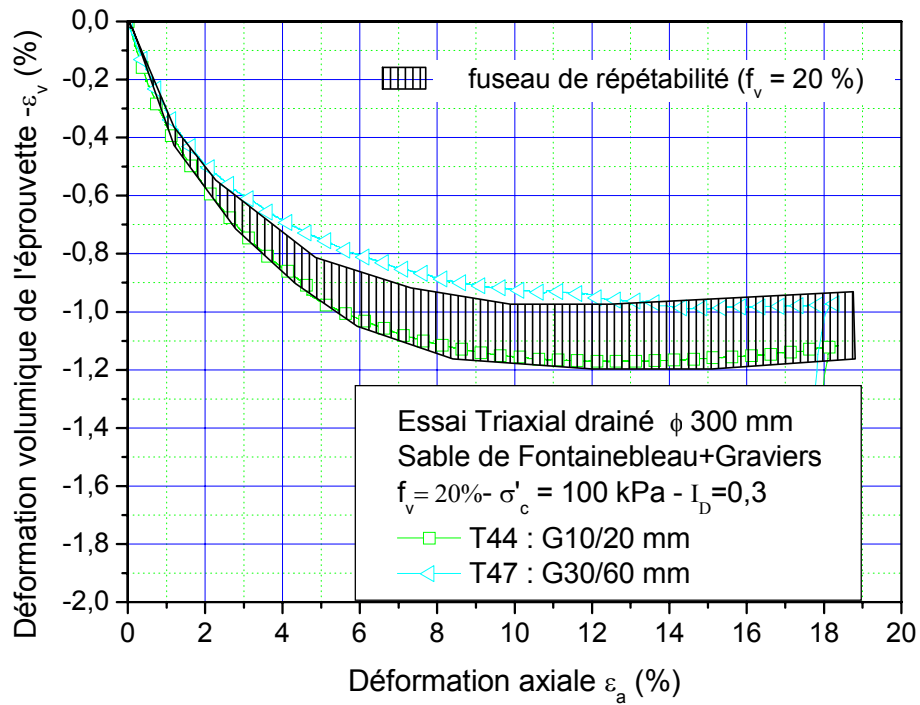


(b)

Figure III. 22: Influence de la fraction volumique des inclusions f_v sur q_{max} pour $I_D = 0,30$: (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).



(a)



(b)

Figure III. 23: Influence de la taille des inclusions pour $I_D = 0,30$: (a) courbes de cisaillement (q , ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique (ε_v , ε_a).

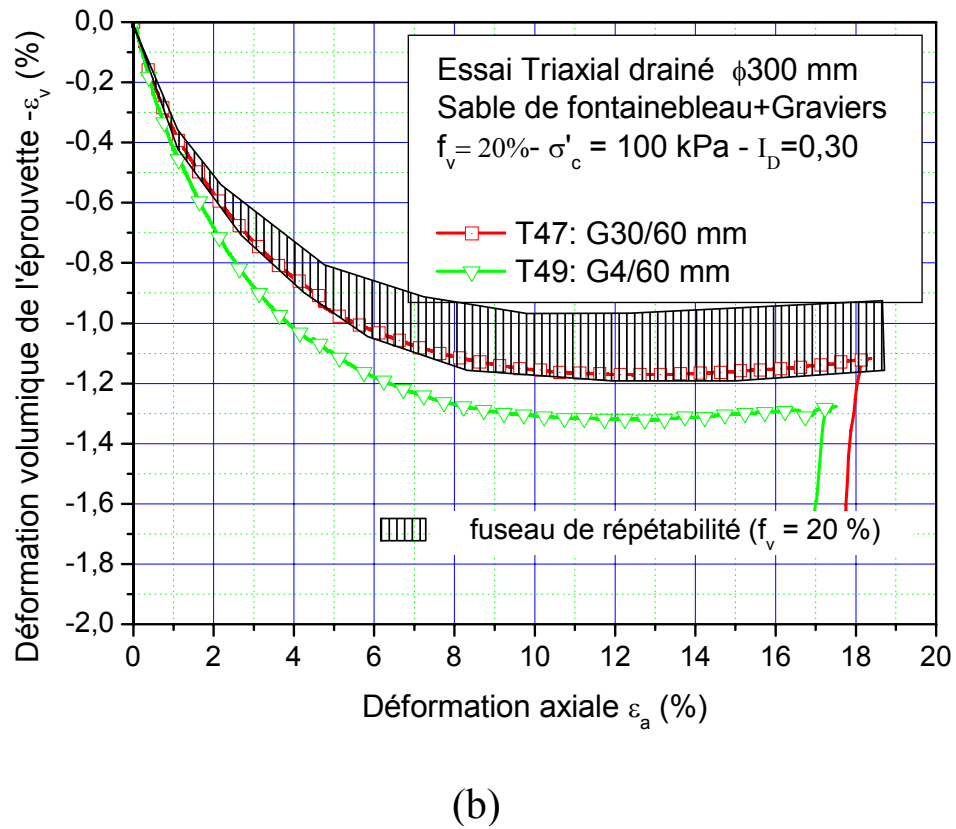
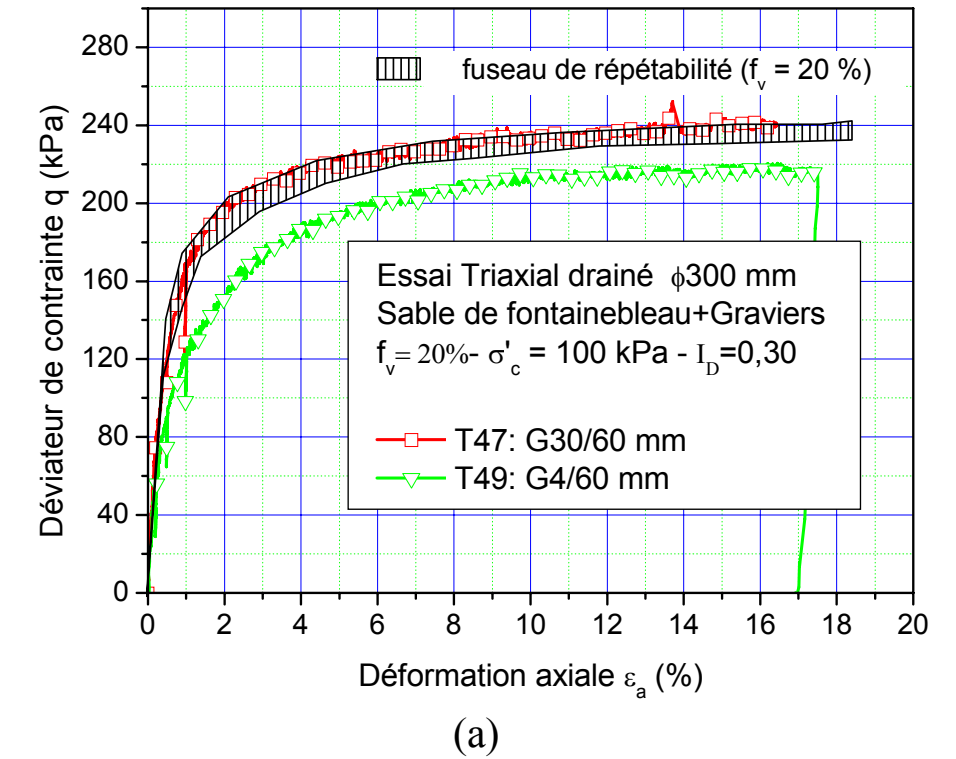


Figure III. 24: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions pour $I_D = 0,30$: (a) courbes de cisaillement (q, ε_a) ; (b) courbes de déformation volumique ($\varepsilon_v, \varepsilon_a$).

III.3.2.4 Comportement des sols modèles à la rupture

Les caractéristiques mécaniques des sols modèles lâches à la rupture sont déterminées de la même façon que dans le cas des matrices denses (paragraphe III.3.1.5). Le Tableau III. 9 présente les valeurs des angles de frottement interne en fonction de la fraction volumique des inclusions f_v .

N° Essai	f_v (%)	ϕ' (°)
T48	0	30,5
T43	12	31,6
T44	20	32,6
T51	20	33,0
T46	35	35,2

Tableau III. 9: Valeurs des angles de frottement interne en fonction de la fraction volumique des inclusions

On remarque, que, de manière évidente, l'angle de frottement interne augmente avec la fraction volumique des inclusions (Tableau III. 9 et Figure III. 25).

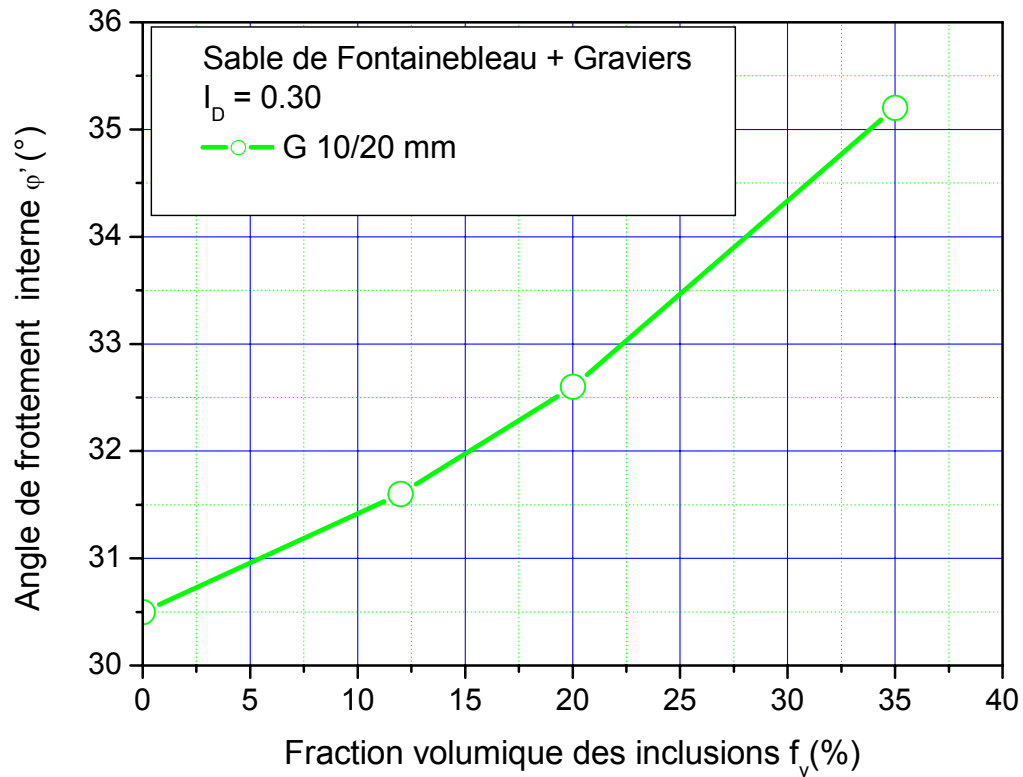


Figure III. 25: Influence de f_v sur ϕ'

III.3.3 Influence de l'état de compacité de la matrice

Pour étudier ce paramètre, nous avons réalisé des essais avec deux états de compacité différents (lâche, avec $I_D = 0,30$, ou dense, avec un $I_D = 0,70$), et ce pour différentes valeurs de f_v (fraction volumique d'inclusions), différentes tailles d'inclusions, différents étalement granulométriques des inclusions et différentes contraintes de consolidation.

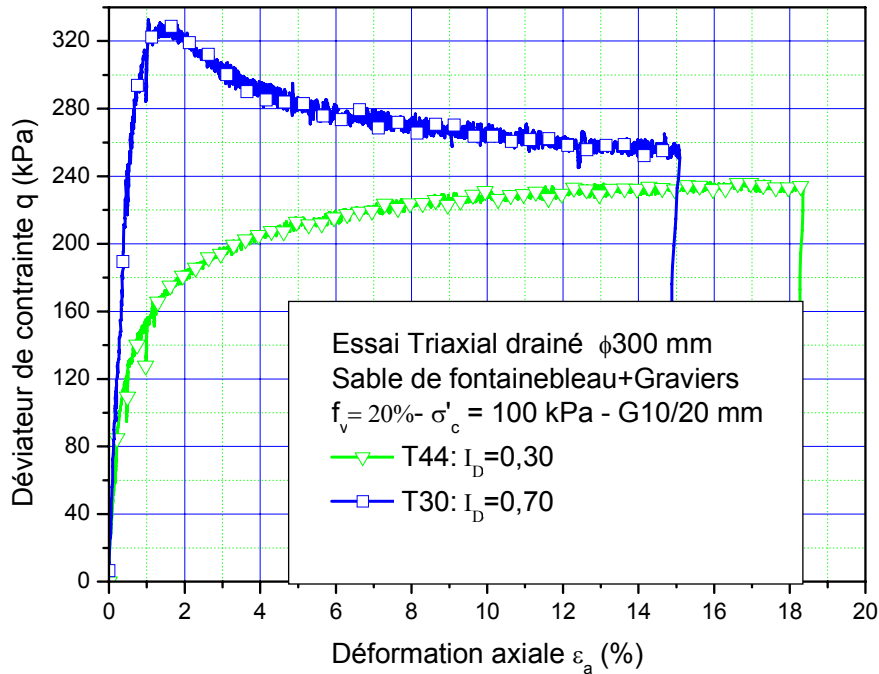
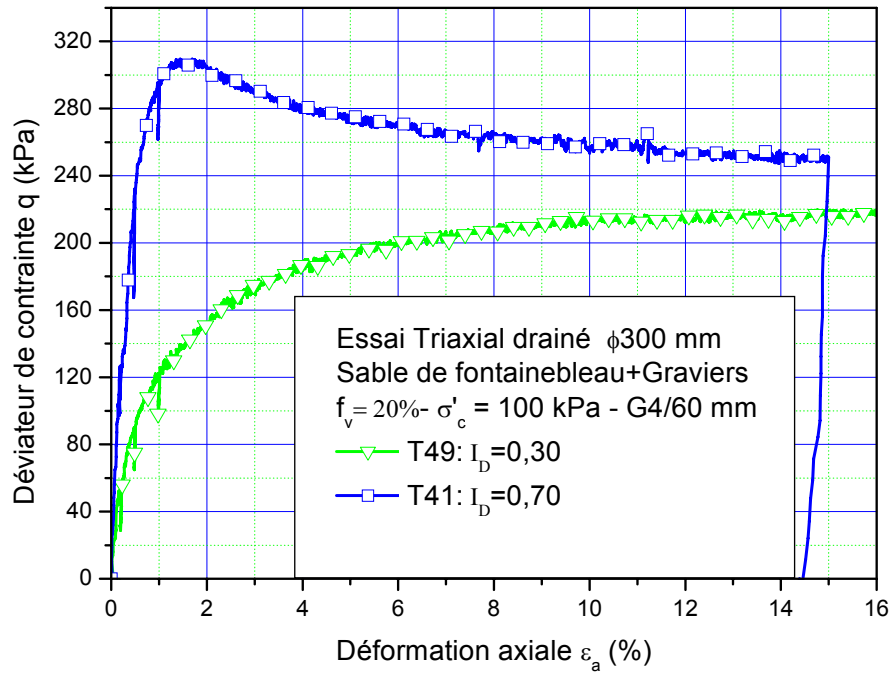


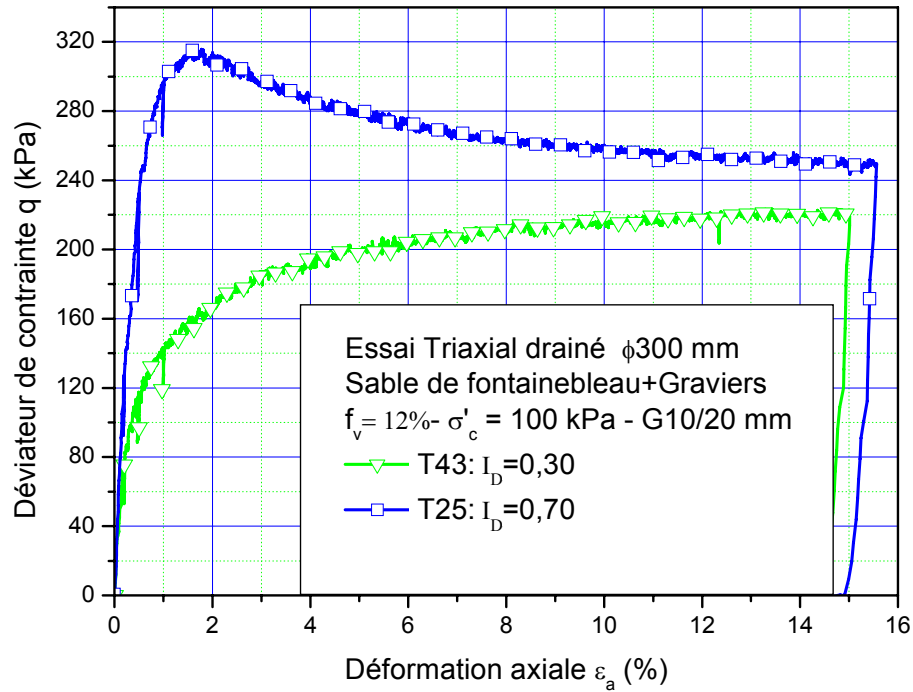
Figure III. 26: Influence de l'indice de densité de la matrice sur la courbe de cisaillement pour $f_v = 20\%$, G 10/20 mm et $\sigma'_c = 100$ kPa.

La Figure III. 26 montre que le comportement mécanique correspondant à la matrice dense est très différent de celui correspondant à une matrice lâche, comme on peut s'y attendre : pour le cas dense, la rupture (ou limite de résistance) correspond à un pic marqué de résistance. Pour le cas lâche, la courbe de cisaillement admet une asymptote horizontale (qui correspond à la valeur de la résistance).

On peut tirer les mêmes conclusions pour un sol modèle avec 12 % de graviers 10/20 mm et pour un autre avec 20 % de graviers 4/60 mm soumis à une contrainte de consolidation de 100 kPa (Figure III. 27) et, par conséquent, ce résultat reste valable lorsque la fraction volumique f_v et le type des inclusions varient.



(a)



(b)

Figure III. 27: Influence de l'indice de densité de la matrice I_D sur la courbe de cisaillement : (a) pour $f_v = 20\%$, G 4/60 mm et $\sigma'_c = 100$ kPa ; (b) pour $f_v = 12\%$, G 10/20 mm et $\sigma'_c = 100$ kPa

Le Tableau III. 10 et la Figure III. 28 montrent que la présence d'inclusions dans l'éprouvette entraîne un accroissement de la résistance au cisaillement identique quel que soit l'état d'arrangement initial de la matrice (I_D). En effet, on voit dans le Tableau III. 10a, que, dans le cas où la matrice est dans un état dense, l'accroissement de déviateur $\Delta q_{\max}/q_{\max, \text{mat}} = 13,58 \%$ et que dans le cas où la matrice est lâche $\Delta q_{\max}/q_{\max, \text{mat}} = 15,86 \%$ (l'incertitude sur l'accroissement de déviateur à la rupture est de 4.25 %).

N° essai	type d'inclusion	f_v (%)	σ'_c (kPa)	I_D	q (kPa)	$\Delta q_{\max}/q_{\text{mat}, \max}$ (%)
T03	-	0	100	0,70	302	0
T27	Gravier 30/60 mm	20			343	13,58
T48	-	0	100	0,30	208	0
T47	Gravier 30/60 mm	20			241	15,86

(a)

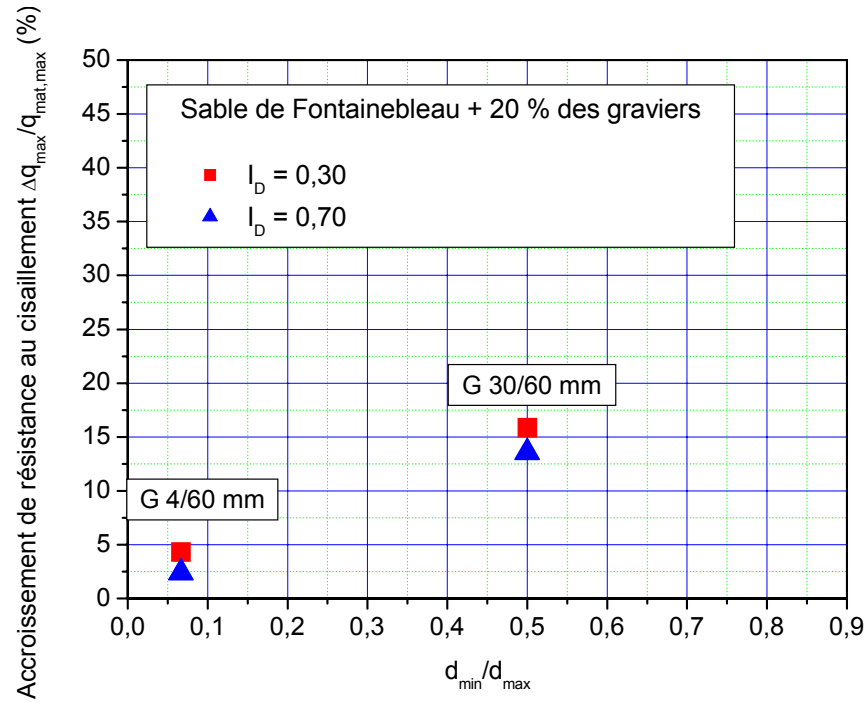
N° essai	type d'inclusion	f_v (%)	σ'_c (kPa)	I_D	q (kPa)	$\Delta q_{\max}/q_{\text{mat}, \max}$ (%)
T03	-	0	100	0,70	302	0
T41	Gravier 4/60 mm	20			309	2,41
T48	-	0	100	0,30	208	0
T49	Gravier 4/60 mm	20			217	4,33

(b)

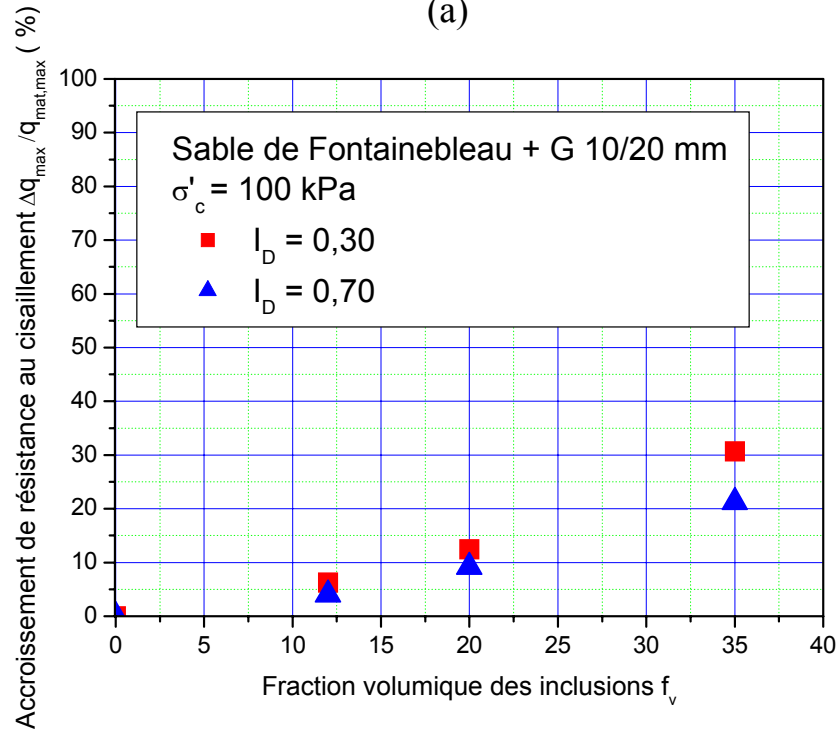
N° essai	type d'inclusion	f_v (%)	σ'_c (kPa)	I_D	q (kPa)	$\Delta q_{\max}/q_{\text{mat}, \max}$ (%)
T03	-	0	100	0.7	302	0
T25	Gravier 10/20 mm	12			314	4,00
T30	Gravier 10/20 mm	20			329	9,17
T36	Gravier 10/20 mm	35			366	21,24
T48	-	0	100	0.3	208	0
T43	Gravier 10/20 mm	12			221	6,25
T44	Gravier 10/20 mm	20			233	12,50
T46	Gravier 10/20 mm	35			273	30,38

(c)

Tableau III. 10 : Caractéristiques des essais mettant en évidence l'influence de l'indice de densité de la matrice I_D sur l'accroissement de résistance au cisaillement $\Delta q_{\max}/q_{\text{mat}, \max}$: (a) cas des graviers 30/60 mm ; (b) cas des graviers 4/60 mm ; (c) cas des graviers 10/20 mm.



(a)



(b)

Figure III. 28 : Influence de l'indice de densité sur l'accroissement de résistance au cisaillement : (a) $\Delta q_{max}/q_{mat,max}$ en fonction de l'étalement granulométrique des inclusions d_{min}/d_{max} ; (b) $\Delta q_{pi}/q_{mat,max}$ en fonction de la fraction volumique d'inclusions f_v .

III.5 Conclusions

Ce chapitre a été consacré à l'étude des paramètres de base caractérisant l'état des sols grossiers de référence étudiés sur leur comportement mécanique à l'aide de l'appareil triaxial de grandes dimensions (Ø300 mm). Dans un premier temps, l'étude de répétabilité a validé la procédure expérimentale, à condition d'utiliser pour chaque essai une matrice neuve. En effet, nous avons constaté, à partir des essais réalisés en réutilisant la même matrice, que la résistance au cisaillement diminue. Ensuite, nous avons étudié l'effet de la fraction volumique f_v , de la taille d_{max} et de l'étalement granulométrique d_{min}/d_{max} des inclusions dans le cas d'une matrice dense et dans le cas d'une matrice lâche.

Dans les deux états de densité de la matrice ($I_D = 0,70$ et $I_D = 0,30$), nous avons constaté que :

- l'augmentation de la fraction volumique f_v des inclusions conduit à l'augmentation de résistance au cisaillement du sol ; donc, la présence des inclusions au sein de la matrice augmente la résistance du sol. Ce résultat est cohérent avec les résultats obtenus par Pedro [2004], Holtz et Gibbs [1956], Donagh et Torrey [1979] et Holtz et Willard [1961] ;
- la taille des inclusions n'a pas d'influence significative sur la résistance du sol ;
- l'étalement granulométrique diminue la résistance du sol ;

Nous avons trouvé que l'état initial de contrainte de consolidation n'a pas d'influence sur l'accroissement de la résistance au cisaillement pour un sol de référence à l'état dense.

L'indice de densité de la matrice influe sur les caractéristiques mécaniques à la rupture du sol grossier : la résistance au cisaillement diminue quand on passe d'un sol dense à un sol lâche.

Finalement, Nous avons montré, que l'accroissement de la résistance au cisaillement est sensiblement indépendant de l'indice de densité de la matrice I_D (différence inférieure à 3 %), pour des fractions volumiques d'inclusions f_v inférieure à 35 %.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES SOLS GROSSIERS A LA GRANDE BOÎTE DE CISAILLEMENT DIRECT

Après l'étude de l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique de sols grossiers de référence à l'aide du dispositif triaxial, nous avons réalisé une étude paramétrique analogue, sur le même type de sol, mais cette fois-ci, à l'aide du dispositif de cisaillement direct de grandes dimensions (300x300x180 mm³), qui se trouve au laboratoire de l'Université Libanaise (Faculté de génie, Beyrouth).

En fin de chapitre, une étude comparative entre les deux types de dispositifs, d'essai triaxial et boîte de cisaillement, est présentée.

IV.1. Programme expérimental

Dans le Tableau IV. 1 on présente le programme expérimental réalisé pour l'étude de l'influence des paramètres suivants :

- fraction volumique des inclusions f_v ;
- taille des inclusions ;
- étalement granulométrique des inclusions.

Pour ces différents essais, nous avons fixé les paramètres suivants :

- état initial de la matrice sableuse ($I_D = 0,70$) ;
- contrainte verticale σ_N (200, 300 ou 400 kPa).

a) Influence de la fraction volumique des inclusions f_v

Nous avons réalisé des essais à l'aide de la grande boîte de cisaillement sur des sols comportant une fraction volumique de graviers G 10/20 mm variant de 0 à 35 %.

Une deuxième série d'essais a été menée avec des inclusions G 8/10 mm et une fraction volumique variant de 0 à 20 %.

b) Influence de la taille des inclusions

Des essais de cisaillement direct ont été réalisés sur des sols reconstitués, en changeant la taille des inclusions d_{max} mais en gardant la même fraction volumique f_v et le même étalement

granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} . Les tailles des inclusions utilisées sont G 8/10 mm et G 16/20 mm respectivement.

c) Influence de l'étalement granulométrique des inclusions

Pour mettre en évidence l'influence de ce paramètre, on a réalisé une série d'essais en faisant varier l'étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} d'un état étalé à un état serré (4/20 mm, 10/20 mm et 16/20 mm), pour une même fraction volumique de graviers f_v , 12 % et 20 % respectivement. Ces essais ont été réalisés sous une contrainte verticale σ_N de 200 et 400 kPa respectivement.

Test	Matrice		Inclusions		σ_N (kPa)
	Type ¹	I_p	Type	f_v (%)	
B01	FB	0,70	G 10-20mm	12	200
B03	FB	0,70	G 10-20mm	12	300
B02	FB	0,70	G 10-20mm	12	400
B04	FB	0,70	G 10-20mm	20	200
B13 (B04 répété)	FB	0,70	G 10-20mm	20	200
B05	FB	0,70	G 10-20mm	20	300
B06	FB	0,70	G 10-20mm	20	400
B14 (B06 répété)	FB	0,70	G 10-20mm	20	400
B07	FB	0,70	G 10-20mm	35	200
B08	FB	0,70	G 10-20mm	35	400
B09	FB	0,70	G 4-20mm	12	200
B17	FB	0,70	G 4-20mm	12	400
B10	FB	0,70	G 4-20mm	20	200
B18	FB	0,70	G 4-20mm	20	400
B11	FB	0,70	G 8-10mm	12	200
B22 (B11 répété)	FB	0,70	G 8-10mm	12	200
B15	FB	0,70	G 8-10mm	12	400
B12	FB	0,70	G 8-10mm	20	200
B16	FB	0,70	G 8-10mm	20	400
B19	FB	0,70	G 16-20mm	12	200
B20	FB	0,70	G 16-20mm	12	400
B21	FB	0,70	G 16-20mm	20	200
B23	FB	0,70	-	0	200
B24	FB	0,70	-	0	300
B25	FB	0,70	-	0	400

(1) FB : Sable de Fontainebleau

Tableau IV. 1: Programme expérimental réalisé à la boîte de cisaillement de grandes dimensions (300x300x180 mm³).

IV.2. Résultats typiques et vérification de la répétabilité des essais

IV.2.1 Résultats typiques

La Figure IV. 1 présente le résultat d'un essai typique réalisé sur un mélange comportant 20 % de graviers 10/20 mm, sous une contrainte normale de 400 kPa (essai B14, Tableau IV. 2). Les résultats de l'essai sont présentés en termes de la courbe de cisaillement, reliant $\tau = F/S_{\text{cor}}$ en fonction du déplacement horizontal mesuré Δl , normalisé par la longueur de l'éprouvette. Ce déplacement normalisé n'a rien à voir avec la déformation de cisaillement locale existant dans le fuseau de cisaillement.

Paramètre	Valeur
f_v	20 %
I_D	0,70
Matrice	Sable de Fontainebleau
σ_N	400 kPa

Tableau IV. 2: Paramètres correspondant à l'essai typique étudié (essai B14)

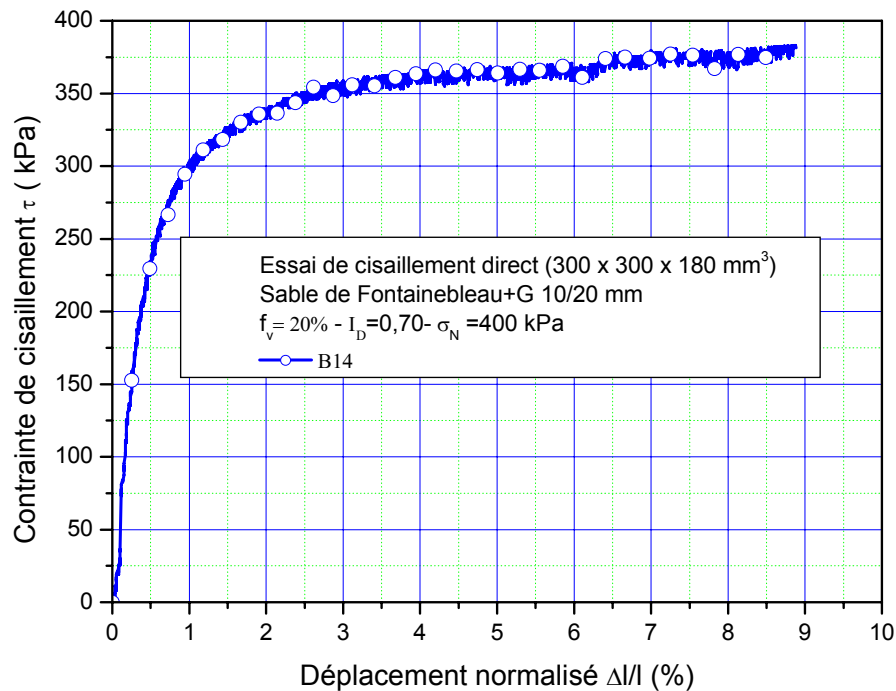


Figure IV. 1: Courbe de cisaillement pour l'essai B14.

On observe que la contrainte au cisaillement augmente initialement de façon quasi-linéaire, qui correspond à la phase « élastique », suivie de la phase de plastification où la contrainte atteint une valeur asymptotique, (ici de 380 kPa). Cette valeur correspond à la rupture de l'éprouvette.

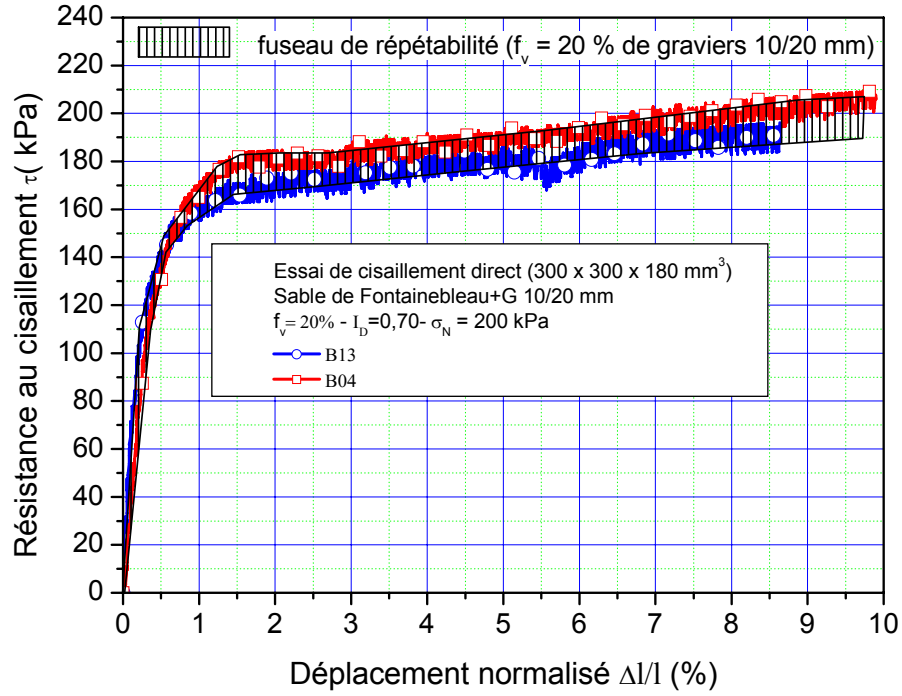
IV.2.2 Répétabilité des essais

Il est important de s'assurer que l'on a une bonne répétabilité de reconstitution du matériau, condition nécessaire pour pouvoir ensuite étudier l'influence des différents paramètres d'état sur le comportement observé.

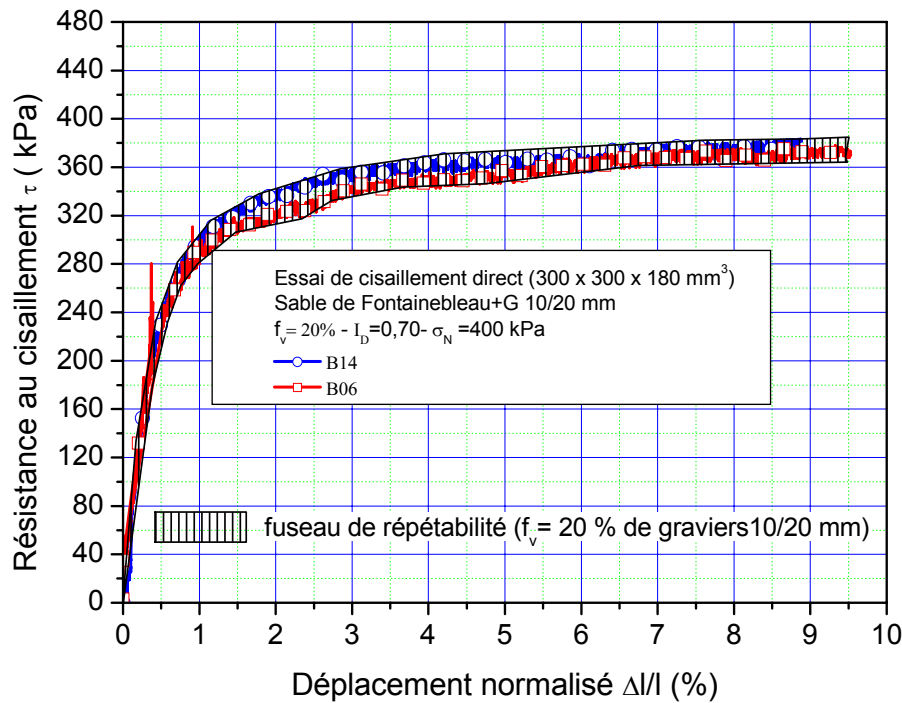
Dans ce but, nous avons réalisé trois séries d'essais (l'indice de densité de la matrice I_D est égal à 0,70) :

- dans la première série, deux essais ont été réalisés sur un mélange contenant 20% de graviers 10/20 mm, sous une contrainte normale de 200 kPa ;
- dans la deuxième série, nous avons réalisé deux essais sur un mélange contenant 20% de graviers 10/20 mm, sous une contrainte normale de 400 kPa ;
- dans la troisième série, nous avons réalisé deux essais sur un mélange contenant 12% de graviers 8/10 mm, sous une contrainte normale de 200 kPa.

Les résultats sont présentés dans la Figure IV. 2 et Figure IV. 3.



(a)



(b)

Figure IV. 2: Essais de répétabilité à la boîte de cisaillement direct : (a) 20% de graviers 10/20 mm sous une contrainte normale $\sigma_N = 200 \text{ kPa}$; (b) 20% de graviers 10/20 mm sous une contrainte normale $\sigma_N = 400 \text{ kPa}$.

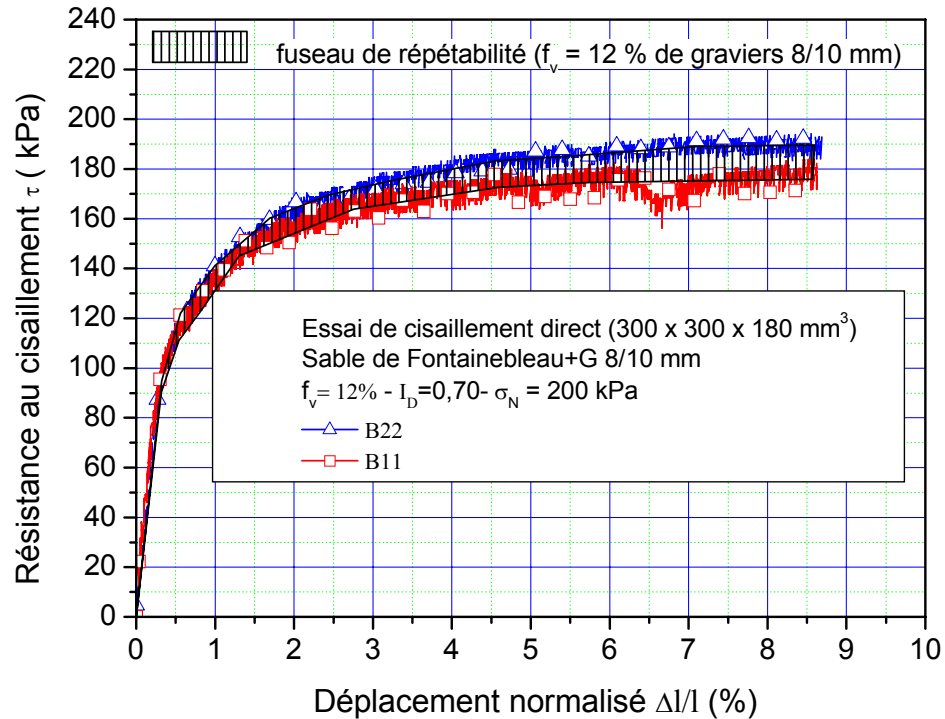


Figure IV. 3: Essais de répétabilité à la boîte de cisaillement direct : 12% de graviers 8/10 mm sous une contrainte normale $\sigma_N = 200 \text{ kPa}$.

On observe une bonne répétabilité en termes de courbe de cisaillement. Cela permet de valider la procédure expérimentale. Ces figures présentent les fuseaux de répétabilité de l'essai de cisaillement à la boîte pour les deux mélanges. L'incertitude sur la valeur de la résistance au cisaillement maximale $\Delta\tau/\tau_{\text{moy}}$ vaut environ 4,5 % dans le cas du mélange (sable de Fontainebleau + graviers 10/20 mm pour 200 kPa), 2,7 % dans le cas du mélange (sable de Fontainebleau + graviers 10/20 mm pour 400 kPa) et 3,7 % dans le cas du mélange (sable de Fontainebleau + graviers 8/10 mm).

IV.3 Influence des paramètres d'étude

IV.3.1. Influence de la fraction volumique f_v des inclusions

La fraction volumique des inclusions présente au sein de la matrice, f_v , constitue un paramètre fondamental dont il est important d'évaluer l'influence sur le comportement. L'influence de ce paramètre est étudiée en réalisant des essais sur des éprouvettes reconstituées à différentes

valeurs de f_v (0, 12, 20 et 35 %). Les essais réalisés pour étudier ce paramètre sont présentés dans le Tableau IV. 3 suivant :

N° Essai	Matériaux		f_v (%)	σ_N (kPa)	I_D
	Matrice ¹	Type d'inclusions			
B23	FB	Graviers 10/20 mm	0	200	0,70
B01			12		
B04			20		
B07			35		
B24	FB	Graviers 10/20 mm	0	300	0,70
B03			12		
B05			20		
B25	FB	Graviers 10/20 mm	0	400	0,70
B02			12		
B06			20		
B08			35		
B23	FB	Graviers 8/10 mm	0	200	0,70
B22			12		
B12			20		
B25	FB	Graviers 8/10 mm	0	400	0,70
B15			12		
B16			20		

(1) FB : Sable de Fontainebleau

Tableau IV. 3: Caractéristiques des essais mettant en évidence l'influence de la fraction volumique des inclusions f_v .

La Figure IV. 4 présente les résultats des essais réalisés sur des mélanges contenant des graviers 10/20 mm sous une contrainte normale de 200 kPa. Sur cette figure, nous avons aussi présenté la courbe correspondant à la matrice seule (essai B23).

La Figure IV. 4 permet de mettre en évidence une influence claire de la fraction volumique des inclusions sur la courbe de la contrainte au cisaillement du sol, avec une augmentation des caractéristiques mécaniques, en particulier en termes de contrainte au cisaillement à la rupture τ_{rup} , avec l'augmentation de f_v .

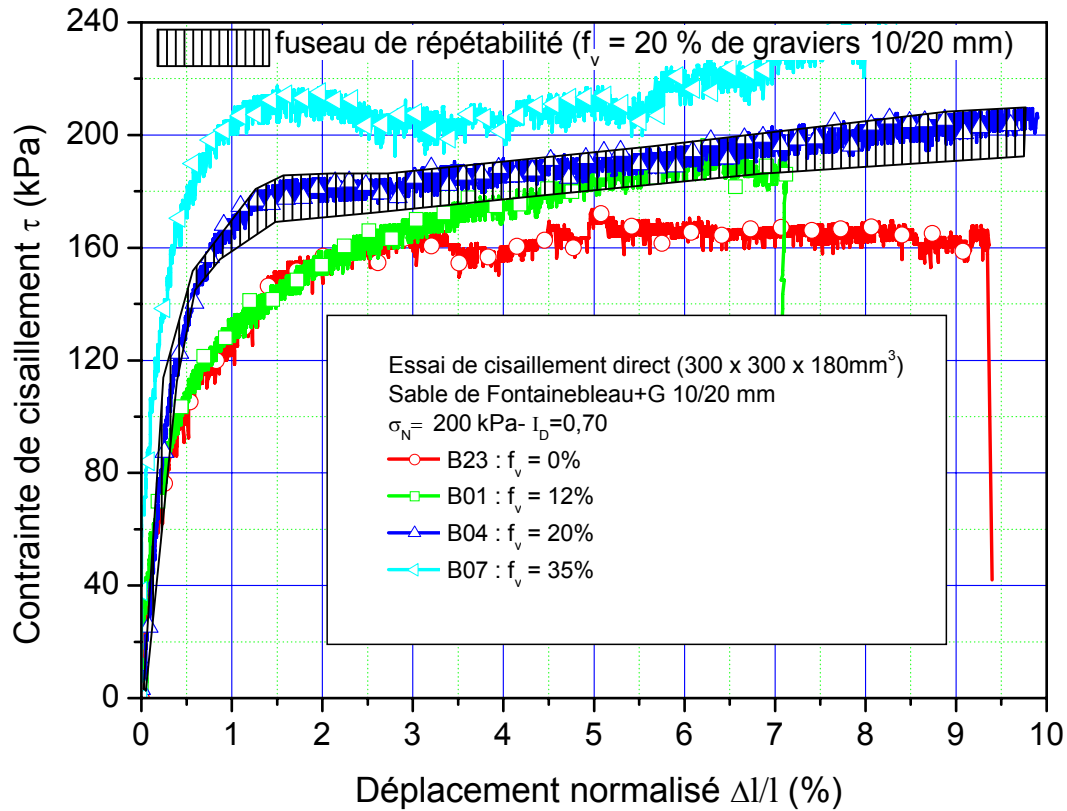
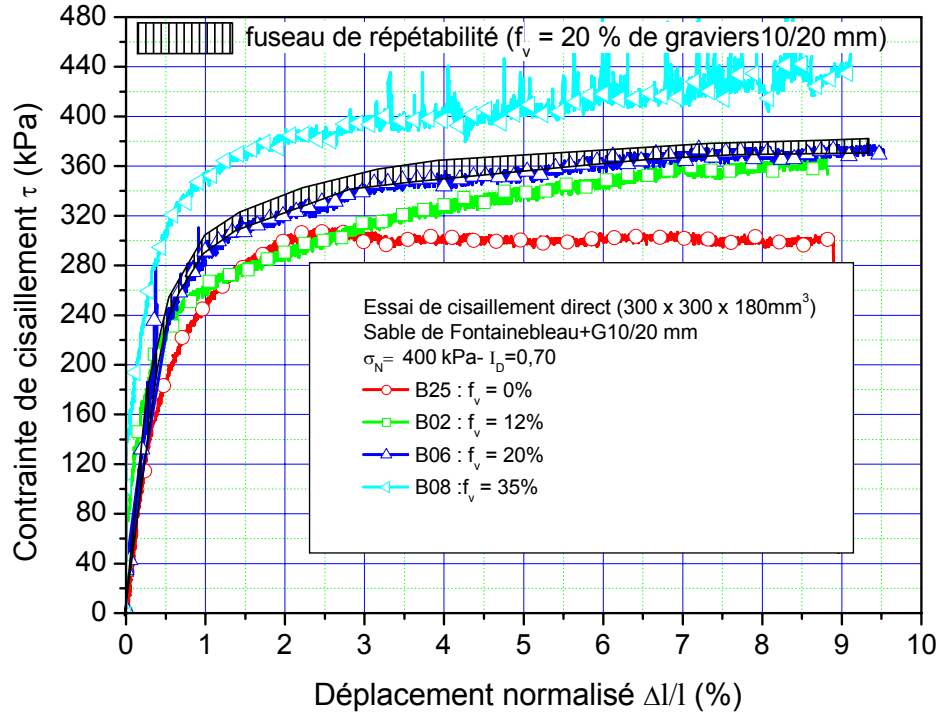
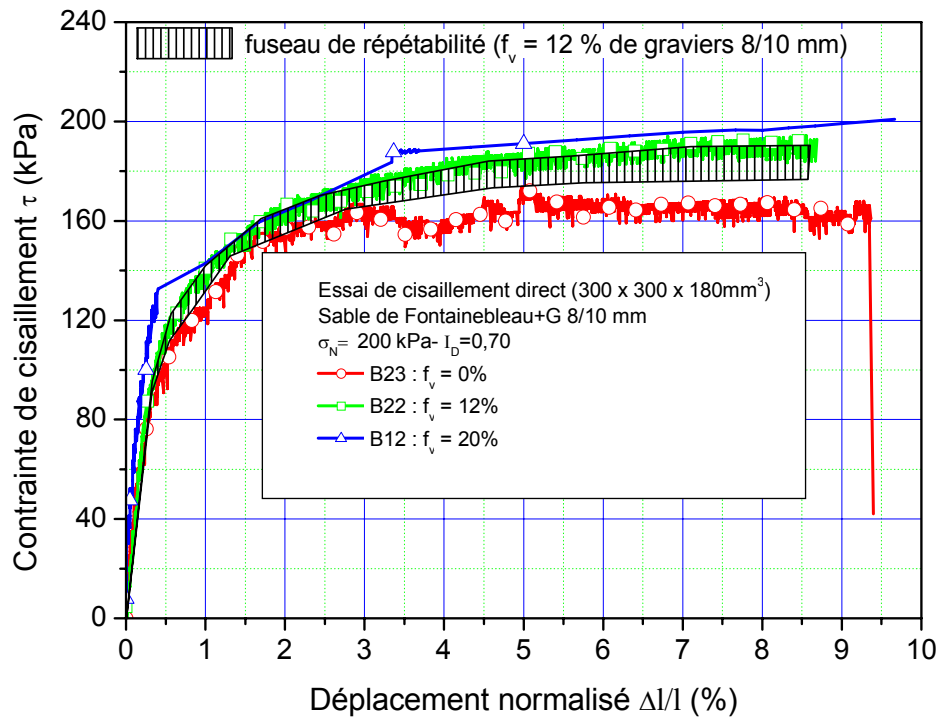


Figure IV. 4: Influence de la proportion volumique f_v de graviers sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

La Figure IV. 5a présente les résultats des essais réalisés sur des mélanges contenant des graviers 10/20 mm sous une contrainte normale de 400 kPa et la Figure IV. 5b présente les résultats réalisés sur des mélanges contenant des graviers 8/10 mm sous une contrainte normale de 200 kPa. Ces figures montrent les mêmes évolutions que la Figure IV. 4, c'est-à-dire que la résistance au cisaillement du sol augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des inclusions f_v . Donc la présence des inclusions au sein de la matrice conduit à l'augmentation de la résistance du sol. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus à l'appareil triaxial. Donc, quel que soit le dispositif utilisé, l'augmentation de la fraction volumique des inclusions augmente les caractéristiques mécaniques à la rupture du sol étudié.



(a)



(b)

Figure IV. 5: Influence de la proportion volumique f_v de graviers sur les comportements observés. Courbes de cisaillement : (a) cas où le sol contient des graviers 10/20 mm ; (b) cas où le sol contient des graviers 8/10 mm.

IV.3.2. Influence de la taille des inclusions

Il est important de pouvoir évaluer l'influence de la taille des inclusions (d_{\max}) sur le comportement observé, pour un étalement granulométrique donné de ces inclusions (translation des courbes granulométriques, d_{\min}/d_{\max} constant). Pour ce faire, on a réalisé des essais sur des éprouvettes comportant une même fraction volumique d'inclusions 8/10 mm et 16/20 mm (Figure IV. 6), tout en gardant les autres paramètres fixes : (a) $f_v = 12\%$, $\sigma_N = 200$ kPa, $I_D = 0,70$; (b) $f_v = 12\%$, $\sigma_N = 400$ kPa, $I_D = 0,70$ et (c) $f_v = 20\%$, $\sigma_N = 200$ kPa, $I_D = 0,70$).



Figure IV. 6: Vues des graviers utilisés dans l'étude de taille des inclusions : (a) graviers 8/10 mm ; (b) graviers 16/20 mm

Le Tableau IV. 4 présente les caractéristiques des essais réalisés pour étudier l'influence de la taille des inclusions sur les comportements observés.

Matériaux					
N° Essai	Matrice ¹	Type d'inclusions	f_v (%)	σ_N (kPa)	I_D
B11, B22	FB	G8/10 mm	12	200	0,70
B19	FB	G16/20 mm			
B15	FB	G8/10 mm	12	400	0,70
B20	FB	G16/20 mm			
B12	FB	G8/10 mm	20	200	0,70
B21	FB	G16/20 mm			

(1) FB : sable de Fontainebleau

Tableau IV. 4: Caractéristiques des essais réalisés pour l'étude de l'influence de la taille des inclusions.

Les résultats obtenus sont illustrés sur la Figure IV. 7.

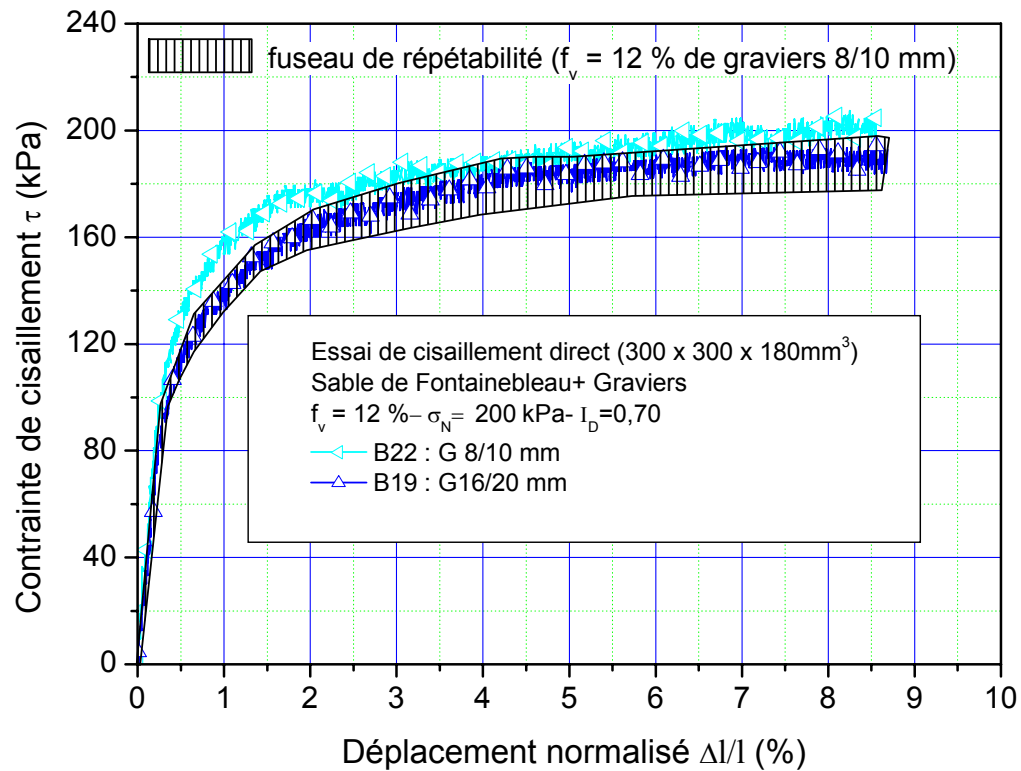


Figure IV. 7: Influence de la taille des inclusions sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

On met en évidence un point important, à savoir que la taille des inclusions n'a pas d'influence significative sur le comportement observé, en termes de courbe de cisaillement (Figure IV. 7).

La Figure IV. 8 présente les essais réalisés pour étudier l'effet de taille des inclusions sur les mêmes matériaux que ceux présentés sur la Figure IV. 7, mais, cette fois, sous une contrainte normale σ_N égale à 400 kPa.

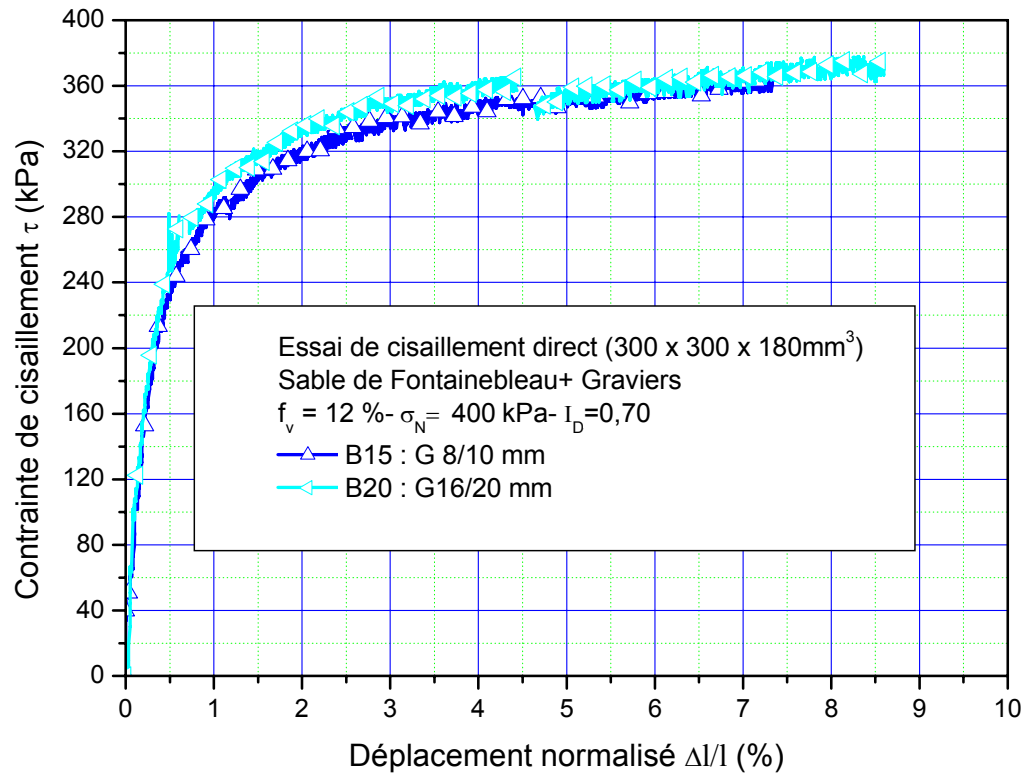


Figure IV. 8: Influence de la taille des inclusions sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

On constate, là aussi, que l'on ne met pas en évidence d'influence significative de la taille des inclusions. Donc, on peut dire que la taille des inclusions ne semble pas avoir d'influence sur le comportement des mélanges étudiés. Comme on avait obtenu à l'appareil triaxial Ø300 mm des résultats analogues, on peut dire que la taille des inclusions n'a pas d'influence significative sur les comportements observés, et, en particulier, à la rupture, quel que soit le type de dispositif utilisé.

IV.3.3 Influence de l'étalement granulométrique des inclusions

L'étalement granulométrique constitue un autre paramètre dont il est important de quantifier l'influence. Pour ce faire, on a testé différentes éprouvettes comportant des phases inclusionnaires caractérisées par différents étalements granulométriques d_{\min}/d_{\max} (16/20, 10/20 et 4/20 mm) (Figure IV. 9), tous les autres paramètres étant restés égaux par ailleurs.



Figure IV. 9: Vues des graviers utilisés pour étudier l'influence de la distribution granulométrique des inclusions : (a) graviers 16/20 mm, (b) graviers 10/20 mm, (c) graviers 4/20 mm.

Pour obtenir des étalements granulométriques importants (4/20 mm) pour les inclusions, nous avons mélangé différentes granulométries, suivant la méthode suivante :

G 4/20 mm: $\frac{1}{2}$ G4/10 mm + $\frac{1}{2}$ G10/20 mm

Nous avons testé deux mélanges, l'un contenant 12% et l'autre 20 % d'inclusions.

a) Cas où $f_v = 12\%$

Deux séries d'essais ont été réalisées sur ces sols reconstitués, la première sous une contrainte normale de 200 kPa, et la seconde sous une contrainte normale de 400 kPa.

La Figure IV. 10 présente les courbes de cisaillement correspondant à la première série ($\sigma_N = 200$ kPa). On met clairement en évidence que les courbes sont très proches les unes des

autres. Cela signifie que l'étalement granulométrique n'influe pas de manière significative sur la courbe de cisaillement, en particulier à la rupture.

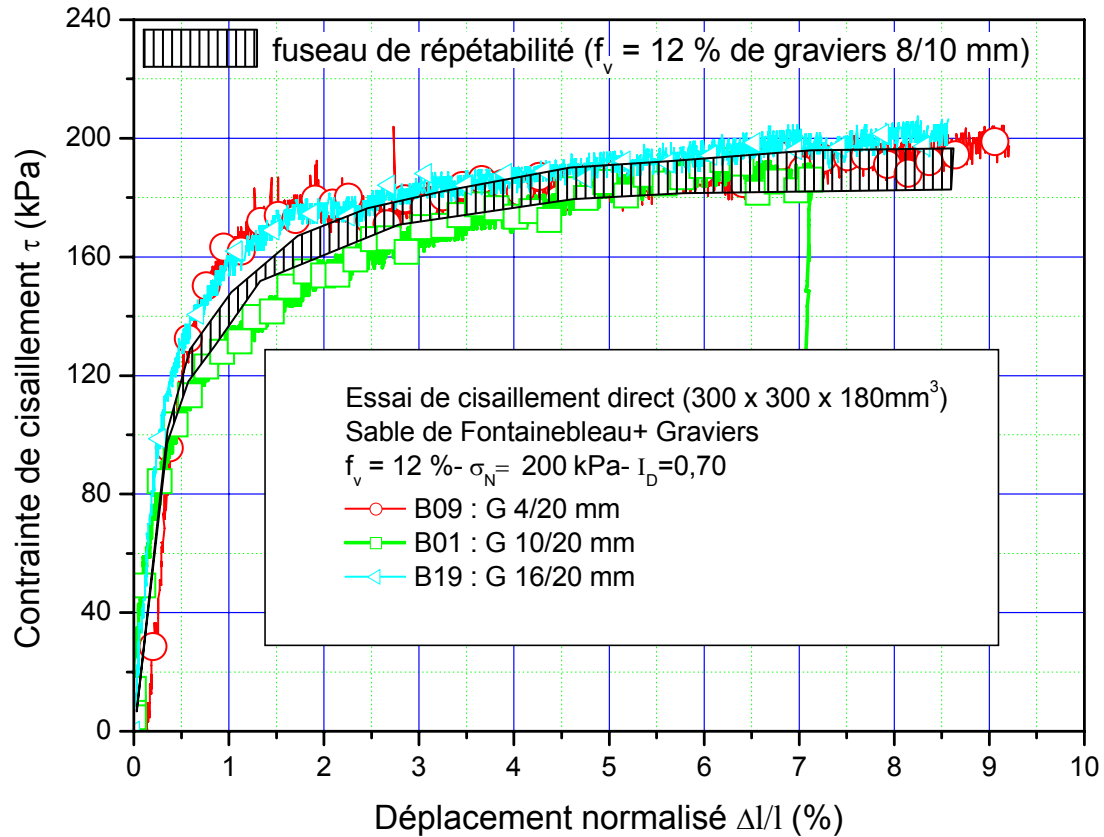


Figure IV. 10: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions (cas où $f_v = 12\%$, $\sigma_N = 200$ kPa) sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

Les résultats de la deuxième série d'essais ($\sigma_N = 400$ kPa), présentés sur la Figure IV. 11, viennent confirmer les résultats obtenus dans la première série.

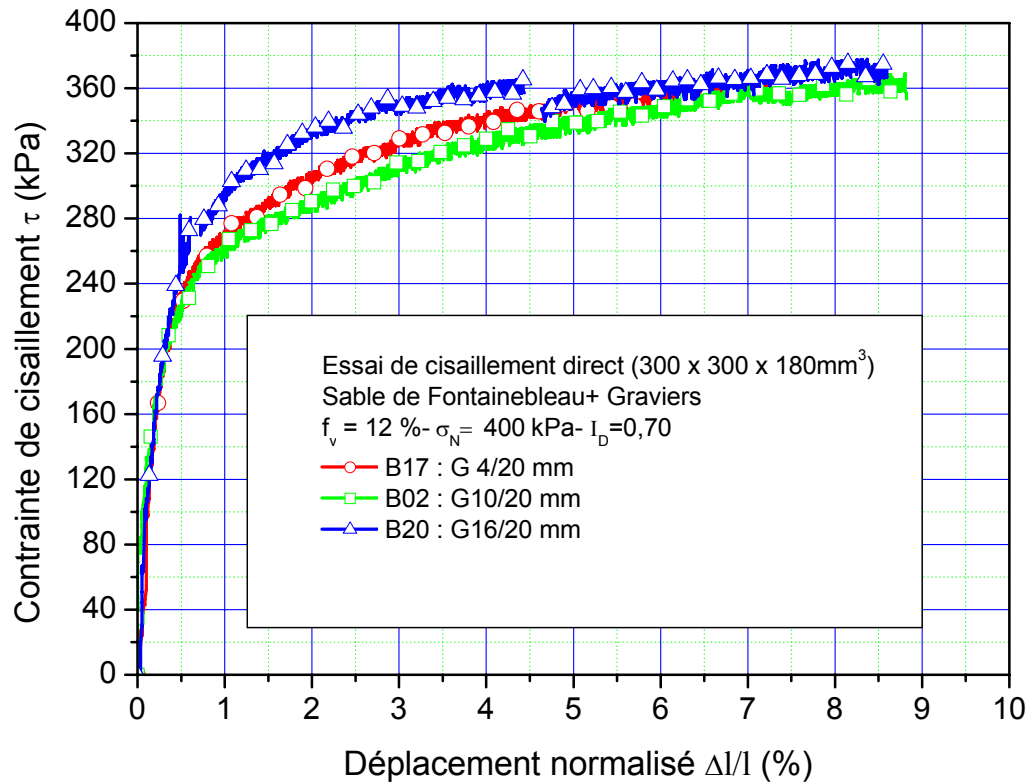


Figure IV. 11: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions (cas où $f_v = 12 \%$, $\sigma_N = 400\text{kPa}$) sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

b) Cas où $f_v = 20 \%$

Nous avons réalisé les deux mêmes séries d'essais pour une fraction volumique $f_v = 20 \%$. La Figure IV. 12 montre que les courbes de cisaillement pour les trois essais étudiés tombent dans le fuseau de répétabilité. Ceci montre que l'effet de l'étalement granulométrique des inclusions est négligeable.

Par ailleurs, la Figure IV. 13, qui présente les résultats de la deuxième série d'essais, montre que toutes les courbes du cisaillement sont quasi-confondues. Donc, on conclut, d'après l'ensemble des résultats obtenus, que l'étalement granulométrique n'influe pas sur le comportement à la rupture des sols grossiers étudiés.

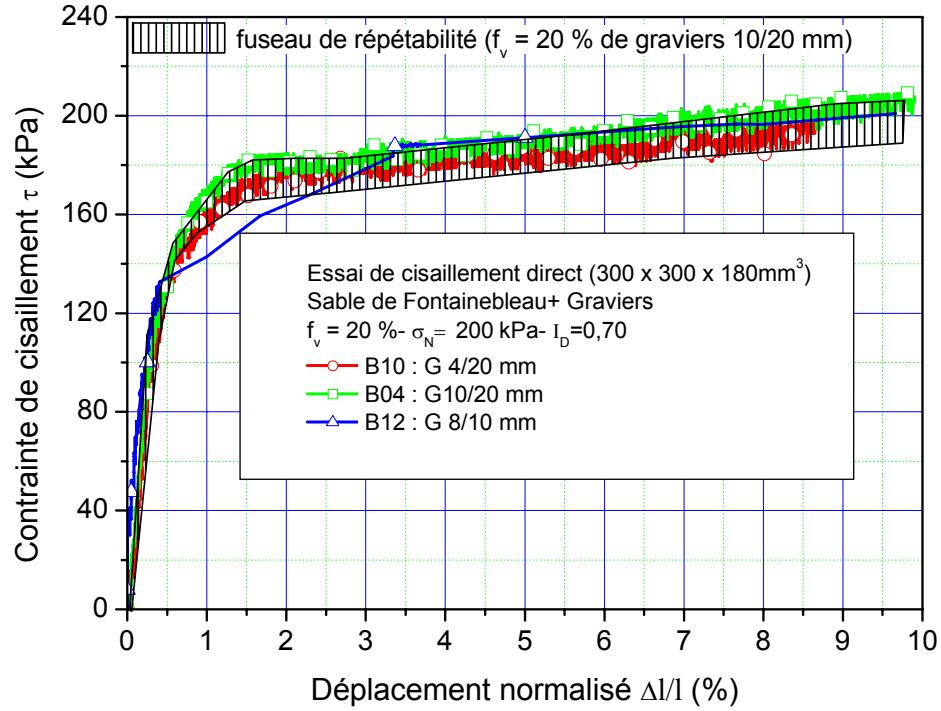


Figure IV. 12: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions (cas où $f_v = 20\%$, $\sigma_N = 200\text{kPa}$) sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

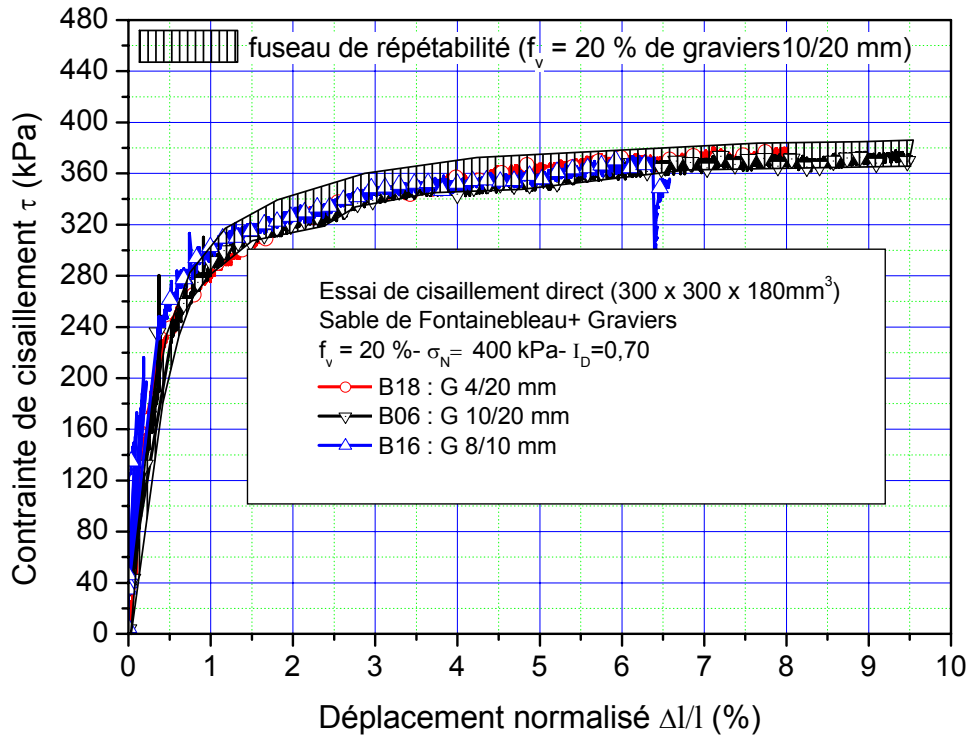


Figure IV. 13: Influence de l'étalement granulométrique des inclusions (cas où $f_v = 20\%$, $\sigma_N = 400\text{kPa}$) sur les comportements observés : courbes de cisaillement.

IV.4. Critère de rupture – Angle de frottement interne

A partir des essais réalisés, on a évalué les caractéristiques de rupture des sols testés. La Figure IV. 14 présente la contrainte de cisaillement évaluée à la rupture (τ_{\max}) pour un mélange constitué de 12 % de graviers 10/20 mm, en fonction de la contrainte verticale dans le plan de Mohr-Coulomb (τ , σ_N). Cette figure confirme que l'on a affaire à un critère de rupture de Mohr-Coulomb (critère linéaire) passant par l'origine des axes (la cohésion apparente est faible et elle est considérée comme nulle), confirmant que l'on retrouve un critère de sol pulvérulent analogue à celui de la matrice seule (le mélange reste en effet pulvérulent), modifié par la présence des inclusions.

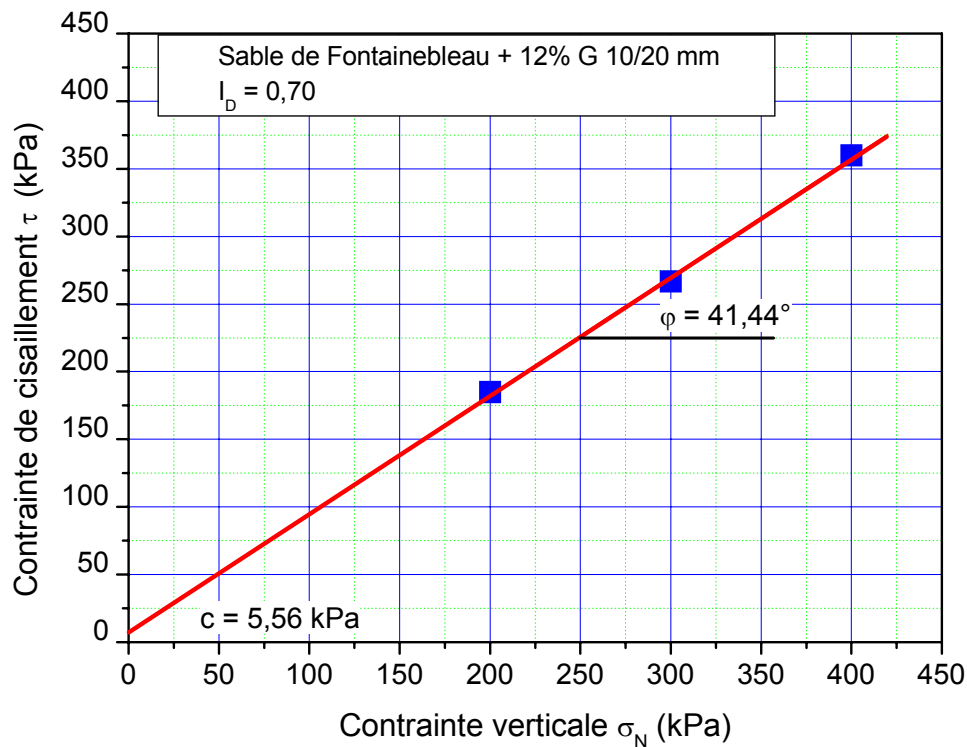


Figure IV. 14: Représentation des états de rupture du sol dans le plan de Mohr-Coulomb (τ , σ_N).

Le Tableau IV. 5 confirme le résultat présenté sur la Figure IV. 14 : les valeurs de la cohésion apparente évaluées pour les différents mélanges sont faibles. On considère dans la suite que les sols étudiés sont pulvérulents ($c' = 0$).

L'ensemble des valeurs d'angle de frottement, évaluées à τ_{\max} sont récapitulées dans le Tableau IV. 6.

Matrice		Inclusions		σ_N (kPa)	Cohésion c (kPa)	Angle de frottement interne φ (°)
Type ¹	I_D	Type	f_v (%)			
FB	0,70	G 10-20mm	12	200	6	41,4
				300		
				400		
FB	0,70	G 10-20mm	20	200	30	40,4
				200		
				300		
				400		
FB	0,70	G 10-20mm	35	200	4	46,8
				400		
FB	0,70	G 8-10 mm	12	200	7	42,0
				200		
				400		
FB	0,70	G 8-10 mm	20	200	32	43,1
				400		
FB	0,70	-	0	200	21	35,0
				300		
				400		

(1) FB : Sable de Fontainebleau

Tableau IV. 5: Valeurs de l'angle de frottement interne φ et de la cohésion, évalués pour la valeur asymptotique de la contrainte de cisaillement τ_{max} , pour différentes fractions volumiques d'inclusions de graviers 10/20 mm et 8/10 mm.

f_v (%)	Valeurs de l'angle de frottement interne (°)			
	G 10/20 mm	G 4/20 mm	G 16/20 mm	G 8/10 mm
0	38.3	38.3	38.3	38.3
12	42,0	42,0	43,5	42,1
20	43,5	43,3	44,5	43,1
35	46,8	-	-	-

Tableau IV. 6: Valeurs de l'angle de frottement interne φ , évalué à τ_{max} pour différentes fractions volumiques d'inclusions de 10/20 mm, 4/20 mm, 16/20 mm et 8/10 mm.

Les valeurs d'angle de frottement interne ont également été reportées sur le graphe synthétique de la Figure IV. 15. Cette figure permet de synthétiser l'influence des différents paramètres étudiés sur l'angle de frottement interne.

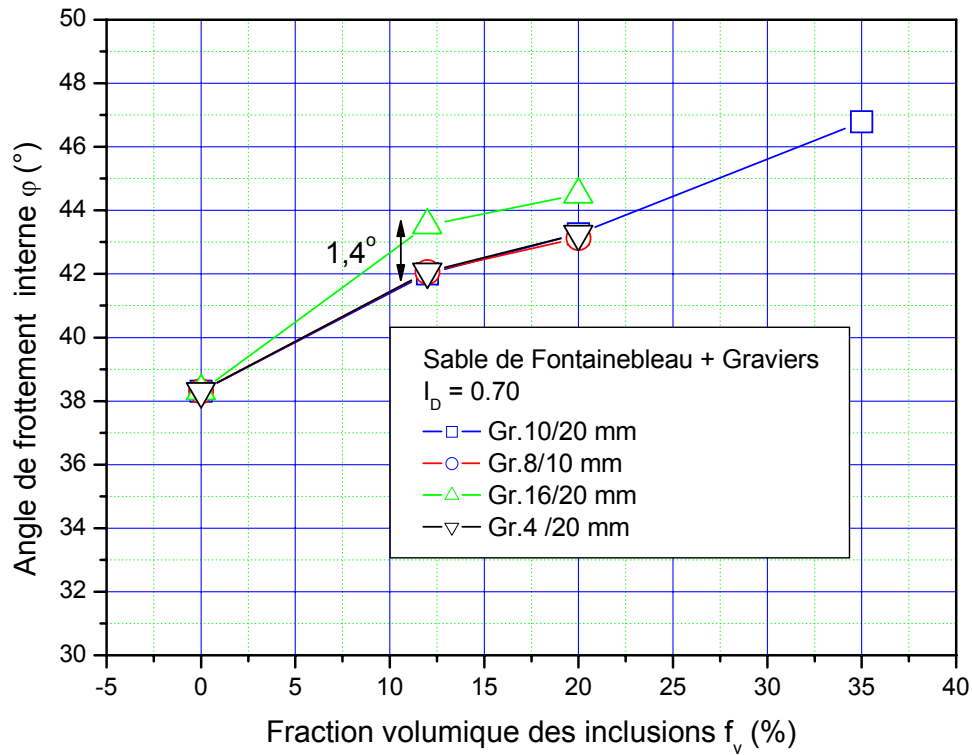


Figure IV. 15: Angles de frottement interne mesurés à la boîte de cisaillement direct.

On retrouve tout d'abord l'effet de renforcement du matériau apporté par les inclusions, avec un angle de frottement interne φ qui augmente de manière significative avec l'augmentation de la fraction volumique d'inclusions, quel que soit le mélange considéré.

Les résultats ont montré que la taille et l'étalement des inclusions restent sans influence significative sur la valeur de l'angle de frottement φ .

Malgré l'effort élevé exercé par la boîte au niveau du plan de cisaillement, on peut imaginer que les inclusions rigides, au lieu de s'écraser du fait du déplacement de la boîte, restent libres de se déplacer dans toutes les directions, d'où l'absence de l'effet de l'étalement granulométrique dans ce cas (Figure IV. 16).

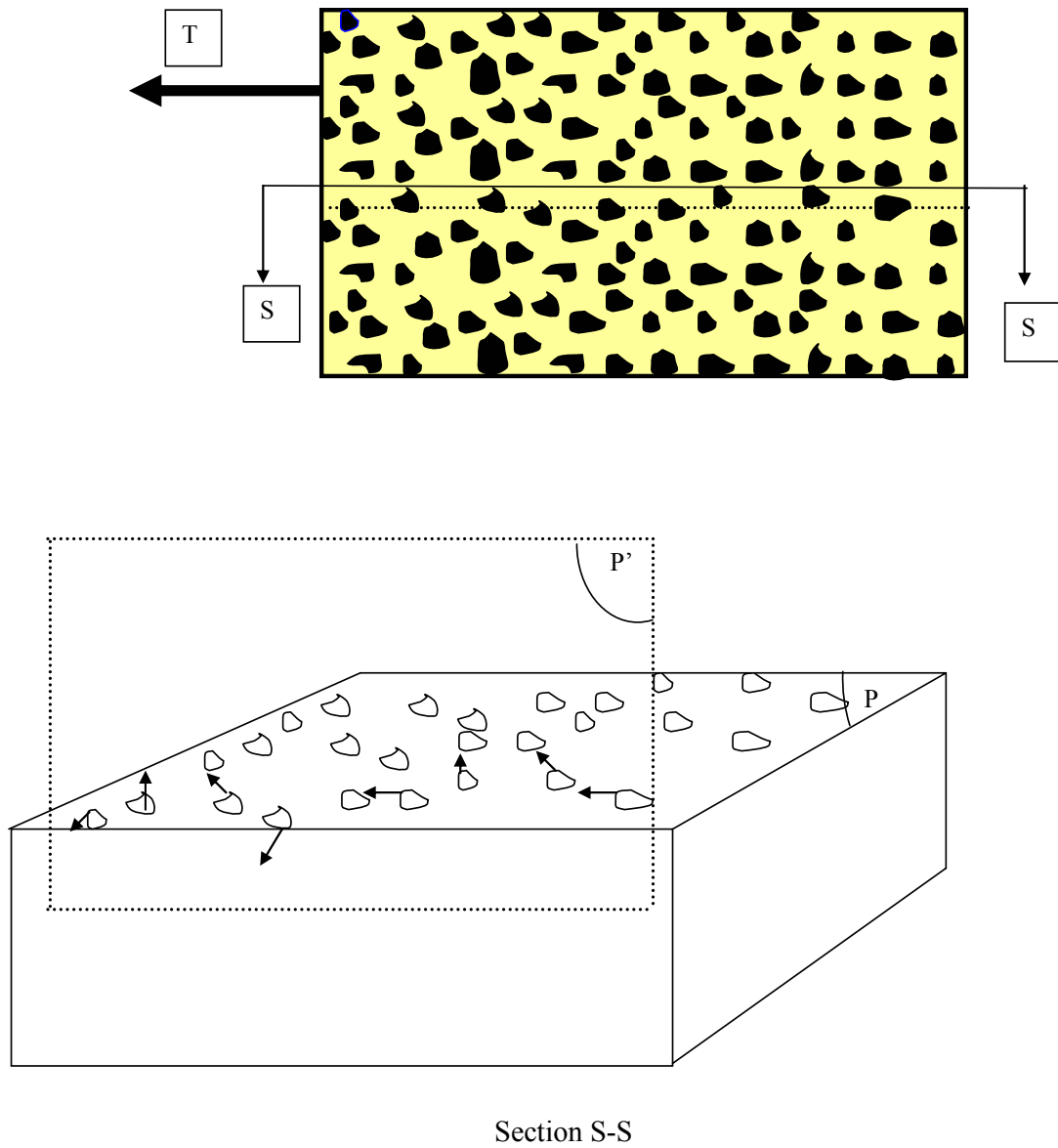


Figure IV. 16 : Effet de l'étalement granulométrique des inclusions sur le comportement mécanique des mélanges dans l'essai à la boîte de cisaillement direct.

IV.5. Comparaison entre les résultats issus de l'appareil triaxial Ø300 mm et ceux issus du dispositif de cisaillement direct de grandes dimensions (300 x 300 x 180 mm³)

Dans le cadre de l'étude du comportement mécanique des sols grossiers, et après l'étude de l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique à l'aide de deux dispositifs de résistance au cisaillement en laboratoire, un point important à étudier est l'effet du type de dispositif expérimental sur les comportements observés. Il faut réaliser une étude comparative des résultats obtenus sur ces deux dispositifs, pour les évaluer l'un par rapport à l'autre.

Pour ce faire, on a comparé les résultats obtenus à partir des deux dispositifs sur deux types de mélanges : le premier est constitué d'une matrice sableuse (sable de Fontainebleau) avec des graviers 8/10 mm et l'autre est constitué d'une matrice sableuse avec des graviers 10/20 mm, en fraction volumique variable. On a utilisé la même procédure de fabrication des éprouvettes pour les deux dispositifs, indiquée dans le chapitre II (II.5), afin d'éviter les problèmes rencontrés par d'autres auteurs tel que la répétabilité des sols naturels, (Valle [2001]).

Pour comparer les résultats obtenus sur les deux appareils, nous avons calculé l'angle de frottement, au maximum de résistance.

IV.5.1 Cas du mélange avec des inclusions 8/10 mm

Dans le Tableau IV. 7 et la Figure IV. 17, nous présentons les valeurs de l'angle de frottement obtenu sur chaque dispositif et pour les différentes fractions volumiques d'inclusions 8/10 mm.

On constate que l'angle de frottement augmente avec l'augmentation de la fraction volumique (f_v) des inclusions, avec les deux dispositifs utilisés ; cela signifie que la quantité des inclusions dans le sol augmente sa résistance au cisaillement.

On observe que les valeurs de l'angle de frottement à la grande boîte de cisaillement sont supérieures à celles obtenues à l'appareil triaxial.

f_v (%)	Valeurs de l'angle de frottement interne (°)	
	Grande boîte de cisaillement	Cellule triaxiale Ø 300 mm
0	38,3	37,1
12	42,1	38,5
20	43,1	40,0
35	-	42,5

Tableau IV. 7: Valeurs de l'angle de frottement obtenues à la boîte de cisaillement et à l'appareil triaxial : graviers 8/10 mm- $I_D = 0,70$.

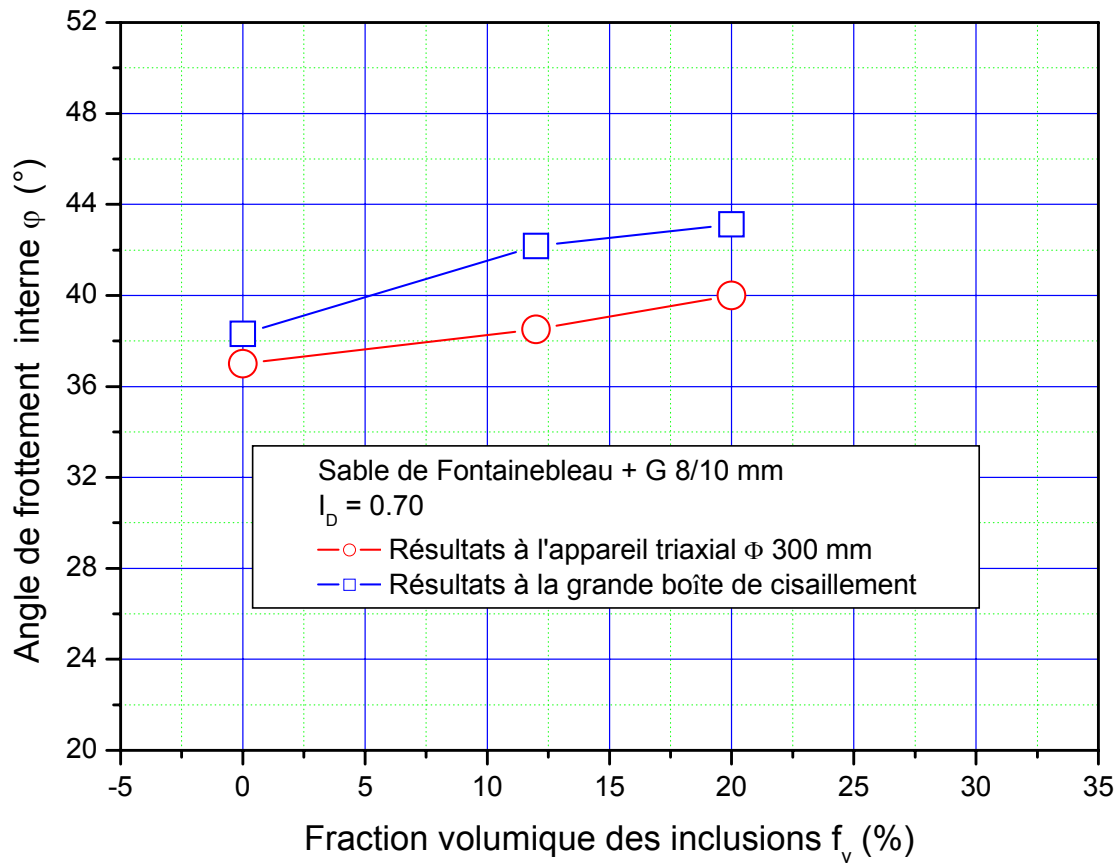


Figure IV. 17: Comparaison entre les valeurs d'angle de frottement interne obtenues à l'appareil triaxial et à la boîte de cisaillement (graviers 8/10 mm).

IV.5.2 Cas du mélange avec des inclusions 10/20 mm

Le Tableau IV. 8 et la Figure IV. 18 présentent les valeurs des angles de frottement obtenues sur les deux dispositifs, pour les différentes fractions volumiques d'inclusions 10/20 mm.

f_v (%)	Valeurs de l'angle de frottement interne (°)	
	Grande boîte de cisaillement	Cellule triaxiale Ø 300 mm
0	38,3	37,1
12	42,0	37,9
20	43,5	39,0
35	46,8	40,5

Tableau IV. 8: Valeurs de l'angle de frottement obtenues à la boîte de cisaillement et à l'appareil triaxial : graviers 10/20 mm- $I_D = 0,70$.

On observe les mêmes différences que pour les inclusions 8/10 mm. Ceci confirme que les valeurs de l'angle de frottement obtenues à la grande boîte de cisaillement sont plus élevées que celles obtenues à l'appareil triaxial.

Pour comprendre cette différence, on pense que ceci peut être expliqué de la manière suivante : la surface de contact des inclusions dans le plan de rupture obtenu sur la boîte est plus importante que celle obtenue à l'appareil triaxial à cause de leur distribution uniforme dans un même plan horizontal, ce qui crée des forces de frottement plus importantes et donc une résistance plus importante.

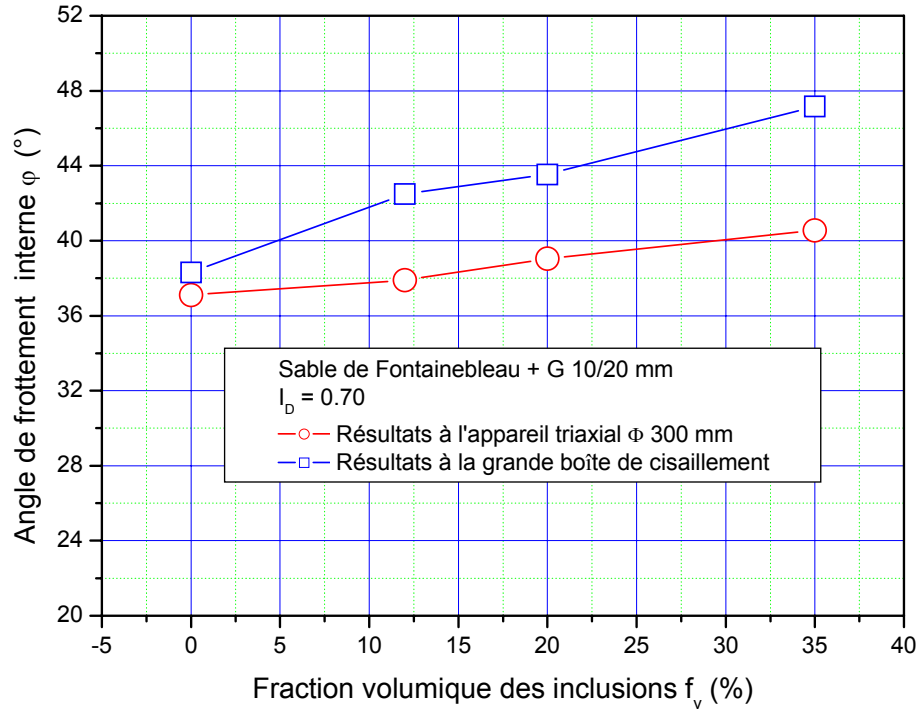
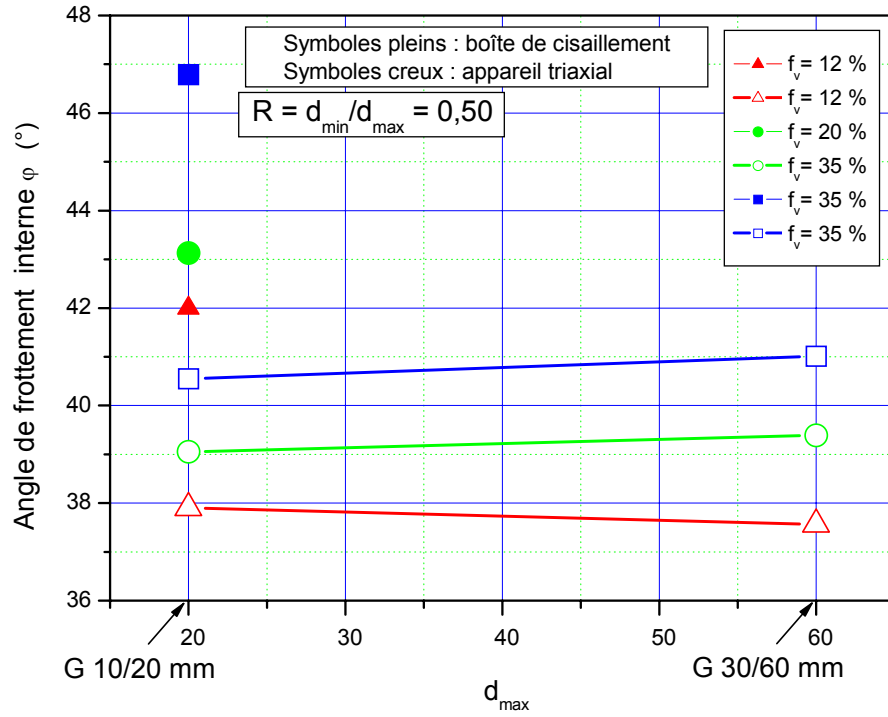


Figure IV. 18: Comparaison entre les valeurs d'angle de frottement interne obtenues à l'appareil triaxial et à la boîte de cisaillement (inclusions 10/20 mm).

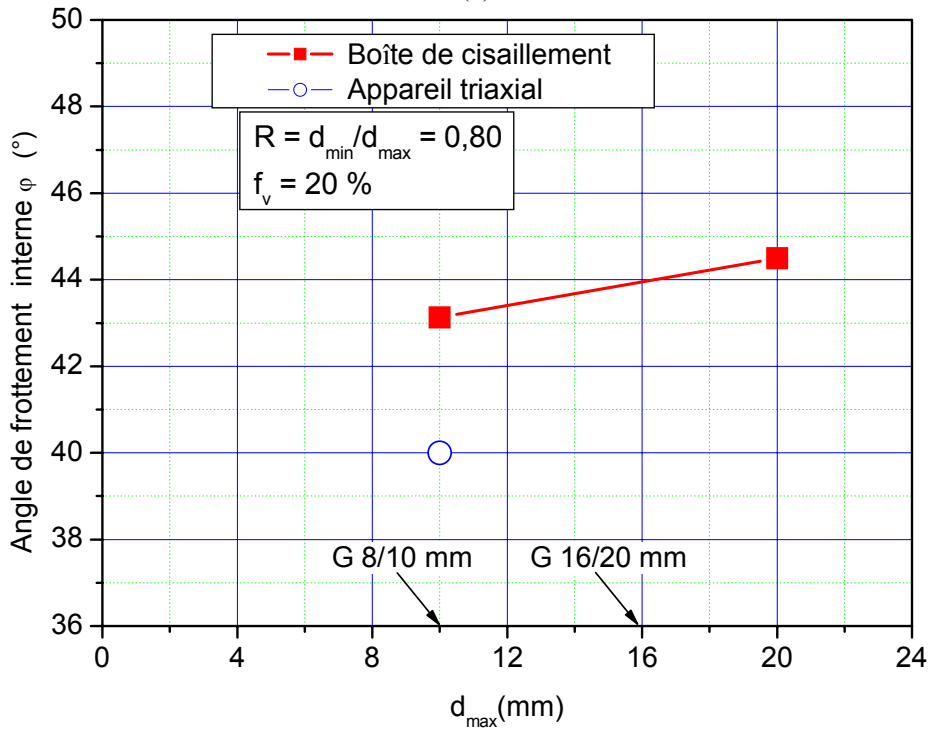
La Figure IV. 19 présente les valeurs d'angle de frottement interne obtenues sur les deux dispositifs utilisés, en fonction de la taille maximale des inclusions d_{max} . Ces sols ont un rapport d_{min}/d_{max} constant. On distingue deux cas :

- cas où le rapport $d_{min}/d_{max} = 0,50$ pour trois fractions volumiques des inclusions ($f_v = 12, 20$ et 35%) ;
- cas où le rapport $d_{min}/d_{max} = 0,80$ pour une seule fraction volumique des inclusions ($f_v = 20\%$).

Dans le premier cas, on remarque que la taille maximale des inclusions d_{max} n'influe pas sur les valeurs de l'angle de frottement interne obtenues à l'appareil triaxial. Le deuxième cas montre la même tendance, mais à la boîte de cisaillement. Aussi, en termes de comparaison entre les deux dispositifs, on trouve toujours que les résultats issus de la boîte de cisaillement sont supérieurs à ceux obtenus à l'appareil triaxial.



(a)



(b)

Figure IV. 19 : Angle de frottement interne en fonction de la taille maximale des inclusions d_{max} ; (a) cas où $d_{min}/d_{max} = 0,50$; (b) cas où $d_{min}/d_{max} = 0,80$

A partir de la Figure IV. 20, on constate que l'étalement granulométrique influe sur les valeurs de l'angle de frottement, obtenues à l'appareil triaxial. Par contre, on trouve que ce paramètre n'a pas d'influence sur les résultats obtenus à la grande boîte de cisaillement. Par ailleurs, on observe, en termes de comparaison entre les deux dispositifs, la même tendance que celles observées pour la fraction volumique et pour la taille maximale des inclusions.

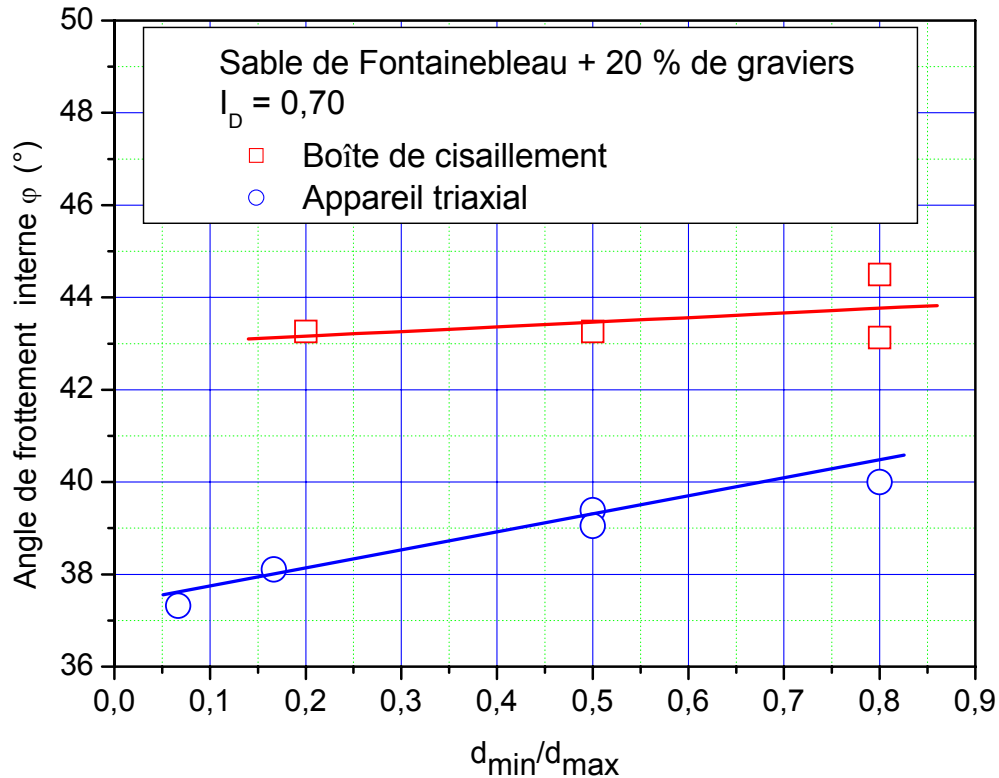


Figure IV. 20 : Angle de frottement interne en fonction du rapport de la taille des inclusions d_{min}/d_{max} .

IV.6. Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats d'un programme d'essais réalisé sur la grande boîte de cisaillement direct, qui se trouve à l'Université Libanaise, Faculté de Génie, Liban, pour étudier le comportement mécanique de sols grossiers à matrice en terme de résistance au cisaillement.

Les résultats obtenus sur les sols de référence étudiés montrent l'effet de renforcement apporté par les inclusions, avec des angles de frottement interne qui augmentent de manière significative avec la fraction volumique des inclusions.

Deux points importants observés concernent la taille des inclusions, qui ne paraît pas avoir d'influence significative sur les caractéristiques mécaniques du matériau, et l'étalement granulométrique des inclusions qui n'a pas, non plus, d'influence significative sur le comportement mécanique de ce type de sol.

Enfin, la comparaison des résultats obtenus sur les deux dispositifs montre que la boîte de cisaillement donne des valeurs d'angle de frottement interne ϕ plus grandes que celles obtenues à l'appareil triaxial. Ces résultats sont cohérents avec des résultats de la littérature (Cruz et Nieble [1971]).

L'essai triaxial permet de mettre en évidence des différences de rhéologie entre la matrice seule et le sol avec inclusions (comportement ductile, fragile), ce que l'essai à la boîte de cisaillement direct ne permet de faire.

Le triaxial permet d'étudier de manière plus fine que la boîte l'influence des paramètres d'étude. Par exemple, l'essai triaxial permet de mettre en évidence l'influence de l'étalement granulométrique des inclusions, ce que ne permet pas de faire l'essai à la boîte.

CHAPITRE V : PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES SOLS GROSSIERS A MATRICE

À partir de l'étude de l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique des sols grossiers à matrice à l'aide des dispositifs d'essais de grande taille, nous allons proposer, dans ce chapitre, une méthodologie en vue de caractériser un sol grossier au laboratoire à l'aide d'un dispositif de taille classique. Ensuite, on tentera de valider la méthodologie proposée sur un sol grossier naturel.

V.1. Réflexion sur l'écrêtement et la substitution

Une des grandes difficultés dans l'étude des sols grossiers provient de la présence des gros éléments qui ne permettent pas de tester un volume de matériau représentatif dans les dispositifs d'essai classiques. En plus, à l'appareil triaxial, on doit toujours garder un rapport entre le diamètre de l'éprouvette et celui des plus grosses particules de sol supérieur à 6 (voir Chapitre I, Eléments bibliographiques). Pour cela, on est obligé d'écrêter ou de substituer ces gros éléments pour pouvoir caractériser ces sols au laboratoire.

Les méthodes actuellement utilisées pour évaluer les caractéristiques mécaniques des sols grossiers en laboratoire sont : l'écrêtement et la substitution. L'important est donc de connaître l'influence de ces méthodes sur les paramètres mécaniques des sols grossiers naturels.

L'étude de l'influence des paramètres fondamentaux sur le comportement mécanique de sols grossiers de référence a permis de comprendre le rôle des inclusions qui sont les éléments à écrêter ou à remplacer dans la pratique, en mettant en évidence le rôle de la fraction volumique f_v , de la taille d_{\max} et de l'étalement des inclusions d_{\min}/d_{\max} sur les comportements observés.

V.1.1 Méthode d'écrêtement

La méthode d'écrêtement consiste à enlever les gros éléments et à tester ce sol écrêté (Figure V. 1). On diminue donc à la fois la fraction volumique f_v des inclusions et l'étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} (Figure V. 2). En effet, on a vu dans le chapitre III, dans le cas des essais triaxiaux, que la diminution de la fraction volumique f_v des inclusions diminue la résistance au cisaillement des sols grossiers (Figure III. 4, Figure III. 5 et Figure III. 6, pages

102-104). Par ailleurs, la diminution de l'étalement granulométrique des inclusions, d_{\min}/d_{\max} , à fraction volumique f_v constante, augmente la résistance au cisaillement du sol (Figure III. 14, et Figure III. 15, pages 113 et 115). On a constaté aussi que la diminution de la résistance due à la fraction volumique est plus importante que l'augmentation due à la diminution de l'étalement granulométrique. Ceci aura pour conséquence une diminution globale de la résistance du sol après l'écèlement. Cette méthode tend donc à sous-estimer les caractéristiques mécaniques du sol grossier.

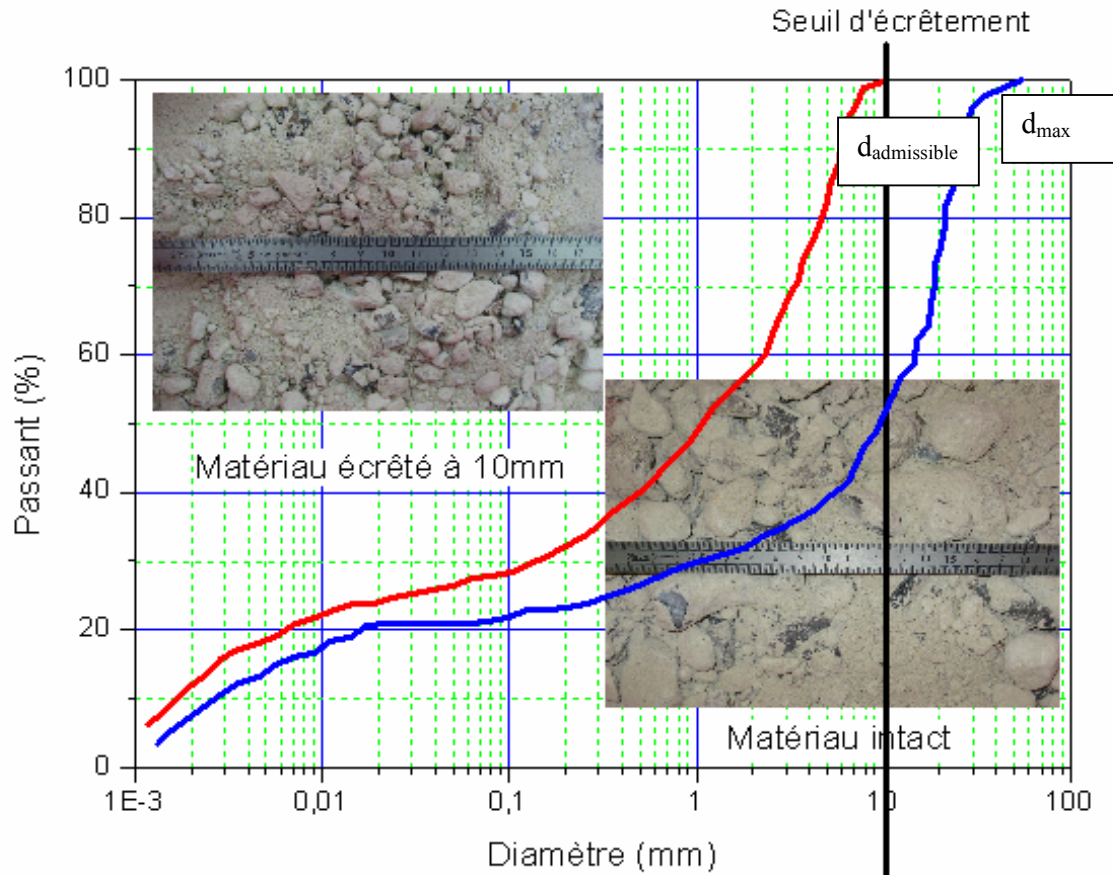


Figure V. 1 : Courbes granulométriques avant et après écelage (schéma de principe)

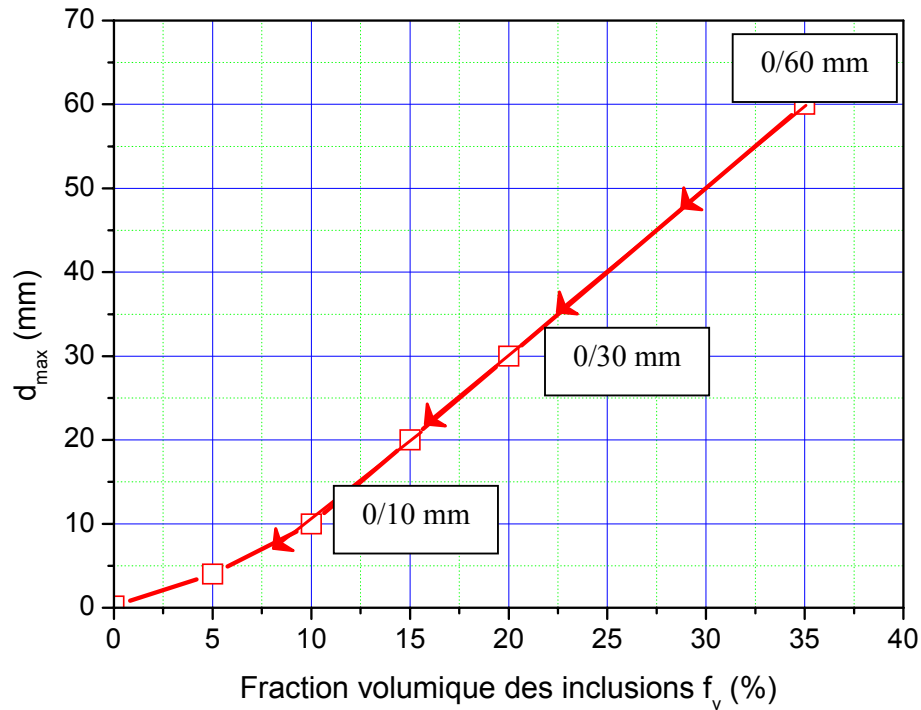


Figure V. 2: Effet de la méthode de l'écrêtement sur la fraction volumique des inclusions f_v et sur l'étalement granulométrique du sol.

V.1.2 Méthode de substitution

La méthode de substitution consiste à remplacer les gros éléments par des éléments de taille plus petite et à tester le sol ainsi reconstitué (Figure V. 3). Cette méthode permet de garder la fraction volumique f_v des inclusions constante, tout en diminuant leur taille d_{max} et leur étalement granulométrique, d_{min}/d_{max} , (Figure V. 4). Dans le chapitre III, on a observé, pour les essais triaxiaux, que la diminution de l'étalement granulométrique des inclusions augmente la résistance au cisaillement des sols grossiers (Figure III. 14 et Figure III. 15). On tend donc à surestimer les caractéristiques mécaniques du sol grossier.

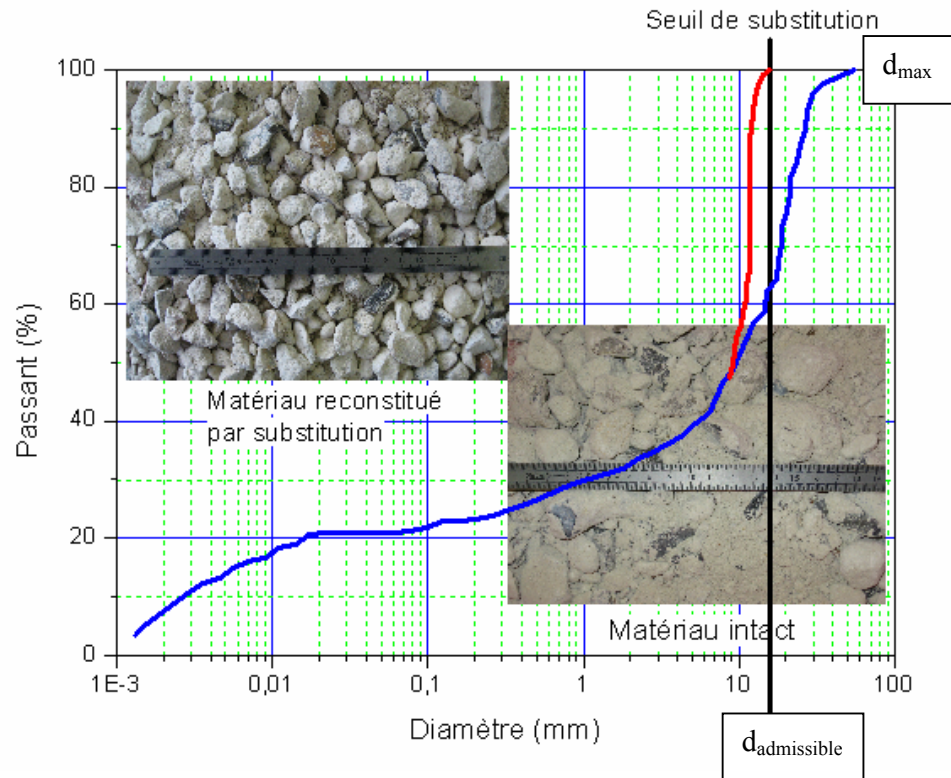


Figure V. 3 : Courbes granulométriques avant et après écrêtement-substitution (schéma de principe)

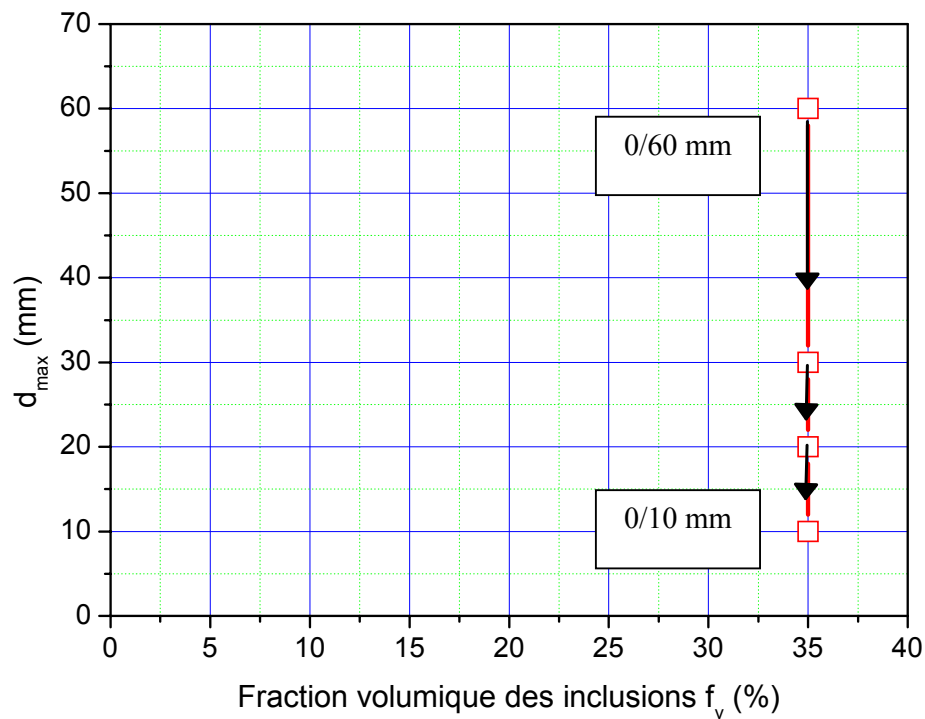


Figure V. 4 : Effet de la méthode de substitution sur la fraction volumique des inclusions f_v et sur l'étalement granulométrique du sol.

V.1.3 Conclusion

La méthode d'écèlement aura tendance à sous-estimer de manière significative les caractéristiques mécaniques du sol grossier complet. Par contre, la méthode de substitution aura tendance à surestimer les caractéristiques mécaniques. Donc, aucune des deux méthodes n'est adaptée à l'évaluation des caractéristiques d'un sol grossier réel. Avec la méthode d'écèlement, on est du côté de la sécurité ; par contre, dans la méthode de substitution, ce n'est pas le cas.

A partir de ces résultats, on a cherché à développer une nouvelle méthode de caractérisation des sols grossiers au laboratoire.

V.2. Proposition d'une nouvelle méthode

La caractérisation des sols grossiers naturels au laboratoire nécessite une phase d'écèlement ou de substitution afin de pouvoir utiliser les dispositifs classiques d'essai.

Au paragraphe précédent, nous avons vu que la méthode d'écèlement ou de substitution n'est pas adaptée à la mesure des caractéristiques réelles de certains sols grossiers (ceux qui nécessitent un écèlement).

On va chercher une nouvelle méthode de caractérisation, basée sur l'utilisation de l'appareil triaxial, et sur l'écèlement, qui tienne compte des résultats obtenus (chapitre III) :

- influence de la taille d_{\max} des inclusions à même étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} ;
- influence de l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} ;
- influence de la fraction volumique des inclusions f_v .

V.2.1 Effet de la taille d_{\max} des inclusions

La Figure V. 5 présente l'accroissement de résistance au cisaillement des sols grossiers de référence étudiés par rapport à leur matrice constitutive en fonction du diamètre maximal d_{\max} des grains pour les trois sols suivants :

- sable de Fontainebleau + 12 % de graviers ;
- sable de Fontainebleau + 20 % de graviers ;
- sable de Fontainebleau + 35 % de graviers.

L'étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} est constant.

La Figure V. 5 montre, dans les trois cas, que l'accroissement de résistance au cisaillement varie peu avec la taille maximale des inclusions d_{\max} . Donc, on considère, par la suite, qu'il n'y a pas d'effet de la taille d_{\max} des inclusions.

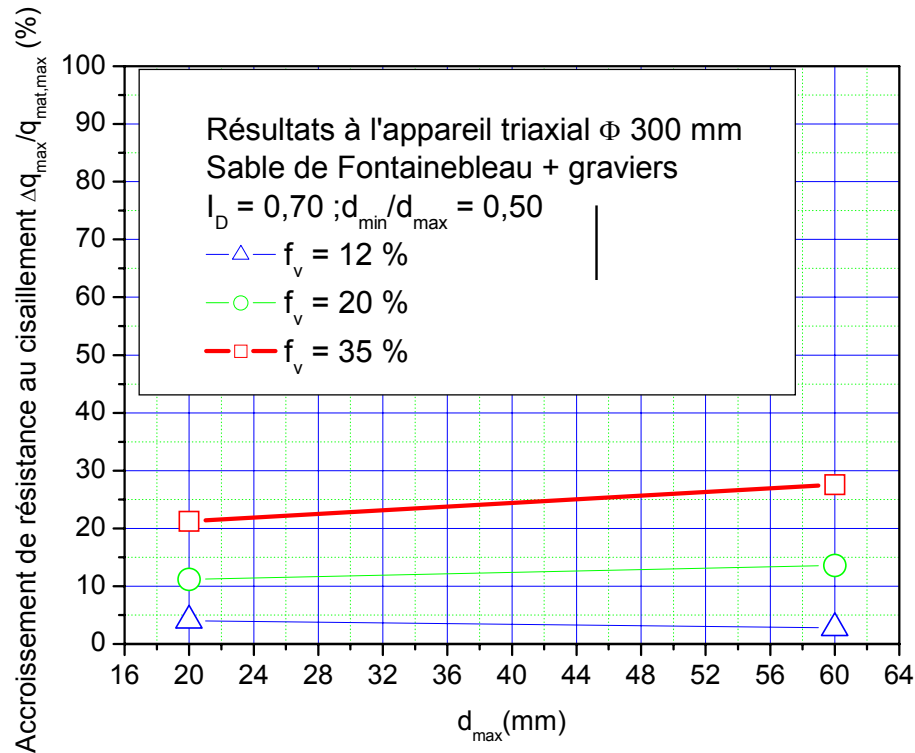


Figure V. 5 : Accroissement de résistance au cisaillement en fonction de la taille maximale d_{\max} des inclusions pour un étalement d_{\min}/d_{\max} constant.

V.2.2 Effet de l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max}

La Figure V. 6 montre que l'accroissement de résistance au cisaillement avec l'augmentation de l'étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} (augmentation de l'ordre de 20 % pour $d_{\min}/d_{\max} = 0,80$). Donc, on retrouve que l'étalement granulométrique a un effet significatif sur la résistance au cisaillement des sols grossiers.

On observe également une corrélation, entre l'accroissement de résistance au cisaillement et l'étalement granulométrique d_{min}/d_{max} , de la forme :

$$\Delta q_{max}/q_{mat,max} = a \cdot d_{min}/d_{max} \quad \text{pour } f_v \text{ constant} \quad (5.1)$$

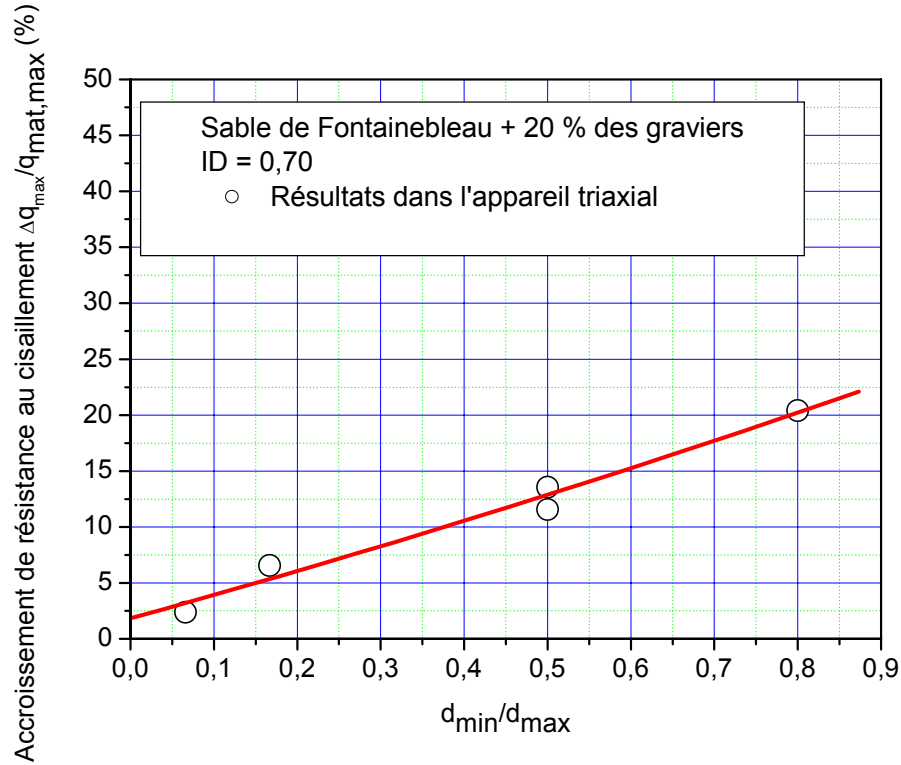


Figure V. 6: Accroissement de la résistance au cisaillement en fonction de l'étalement granulométrique d_{min}/d_{max} .

V.2.3 Effet de la fraction volumique des inclusions (f_v)

La Figure V. 7 présente l'effet de la fraction volumique des inclusions pour les différents sols de référence étudiés. On trouve, dans tous les cas, que l'accroissement de résistance au cisaillement augmente avec la fraction volumique f_v (augmentation de l'ordre de 40 % pour un mélange contenant du sable de Fontainebleau et 35 % de graviers 8/10 mm). Donc, la fraction volumique a un effet significatif sur le comportement des sols grossiers.

On trouve aussi une corrélation linéaire entre l'accroissement de résistance au cisaillement de sol et la fraction volumique de la forme :

$$\Delta q_{max}/q_{mat,max} = b \cdot f_v \quad (5.2)$$

Le Tableau V. 1 montre les valeurs du coefficient (b) pour les différents types de sols grossiers de référence étudiés.

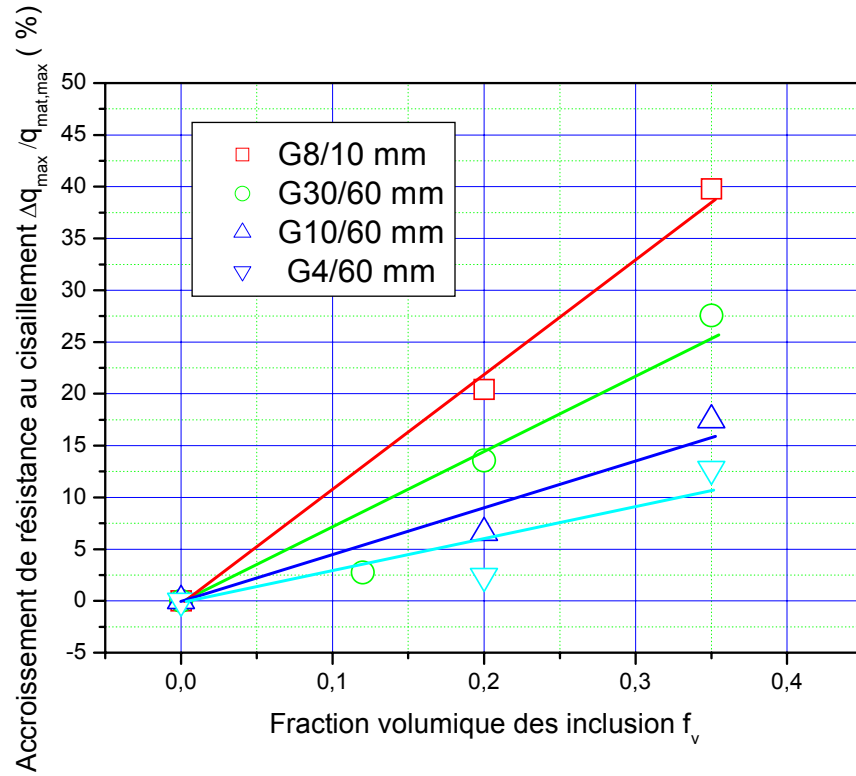


Figure V. 7: Accroissement de résistance au cisaillement en fonction de la fraction volumique f_v des différents types de sols grossiers étudiés.

Gravier (d_{\min}/d_{\max})	Pente b (sans unité)
Gravier 8/10 mm	111
Gravier 30/60 mm	72
Gravier 10/60 mm	46
Gravier 4/60 mm	30

Tableau V. 1: Valeurs du coefficient b en fonction de l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} .

V.2.4 Méthode proposée

La méthode proposée pour caractériser un sol grossier à matrice à l'aide de l'appareil triaxial de taille courante peut être résumée par les cinq étapes suivantes :

- 1- Prélèvement d'échantillons de sol grossier à matrice sur site ;
- 2- Identification du matériau naturel utilisé ;
- 3- Identification de la matrice et des inclusions (seuil d'écèlement, cf. ci-dessous) ;
- 4- Réalisation d'une série d'essais triaxiaux sur la matrice, (même état de densité que celle *in situ*) ;
- 5- Ajout de l'accroissement de la résistance au cisaillement résultant des inclusions écèlées à la valeur obtenue à l'essai triaxial sur la matrice :

$$q_{\text{sol compl,max}} = q_{\text{sol écèté,max}} + \Delta q_{\text{max}} \quad (5.3)$$

avec

$q_{\text{sol compl,max}}$: résistance maximale au cisaillement du sol grossier complet ;

$q_{\text{sol écèté,max}}$: résistance maximale au cisaillement du sol écèté (matrice);

Δq_{max} : $q_{\text{sol compl,max}} - q_{\text{mat,max}}$: accroissement de résistance au cisaillement du sol complet par rapport à la matrice seule (sol écèté) , obtenu à l'aide des corrélations du type de celles présentées dans les sections V.2.2 et V.2.3.

Dans la méthode proposée, l'étape la plus importante est la troisième. En effet, il faut pouvoir identifier, à partir du sol naturel, une matrice et des inclusions, c'est-à-dire un seuil d'écèlement. On propose le critère suivant :

La fraction volumique des inclusions à écèter $f_v < 35 \%$.

En effet, au-delà de 35%, les graviers se touchent et forment une structure « macro-granulaire » qui va contrôler le comportement d'ensemble. On ne peut donc plus considérer que les inclusions sont noyées au sein de la matrice. Donc il y a des différences de comportement observées entre $f_v \leq 35 \%$ et $f_v > 35 \%$ (Pedro 2004).

Une fois cette étape réalisée, on obtient la valeur de d_{\min}/d_{\max} de la partie inclusions. On doit également vérifier que le diamètre des plus gros éléments de la partie matrice est inférieur ou égal à $1/6$ du diamètre de l'éprouvette (Valle 2001).

Si toutes ces conditions sont respectées, on peut obtenir la résistance au cisaillement du sol naturel à partir de la résistance de la partie matrice uniquement.

La méthode est donc basée sur des corrélations obtenues à partir des résultats triaxiaux. La première étape consiste à corréler le taux d'accroissement du déviateur au pic de résistance par rapport à celui de la matrice. La Figure V. 7 présente l'accroissement de déviateur à la rupture d'un sol grossier à matrice par rapport à la matrice seule ; on trouve une corrélation linéaire entre l'accroissement de déviateur avec la fraction volumique des inclusions pour les différents types d'inclusions de la forme :

$$\Delta q_{\max}/q_{\text{mat},\max} = b.f_v = f(d_{\min}/d_{\max}). f_v \quad (5.2)$$

avec

Δq_{\max} : $q_{\text{sol compl},\max} - q_{\text{mat},\max}$: accroissement de résistance au cisaillement du sol complet par rapport à la matrice seule ;

$q_{\text{sol compl},\max}$: résistance maximale au cisaillement du sol grossier complet ;

$q_{\text{mat},\max}$: résistance au cisaillement de la matrice seule ;

f_v : fraction volumique des inclusions ;

b : pente de la droite de corrélation de $\Delta q_{\max}/q_{\text{mat},\max}$ avec f_v .

On peut également montrer que la pente des droites dépend du type d'inclusions (d_{\min}/d_{\max}) (Figure V. 7): la pente augmente lorsque l'on passe d'un sol qui contient des inclusions étalées à un sol qui contient des inclusions serrés. Le Tableau V. 2 présente les valeurs de la pente b du rapport à l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} . Le paramètre b dépend donc de l'étalement d_{\min}/d_{\max} .

Gravier (d_{\min}/d_{\max})	d_{\min}/d_{\max}	Pente b (sans unité)
Gravier 8/10 mm	0,80	111
Gravier 30/60 mm	0,50	72
Gravier 10/60 mm	0,17	46
Gravier 4/60 mm	0,07	30

Tableau V. 2: Valeurs du coefficient b en fonction du type et de l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} .

La Figure V. 8, présente l'évolution du coefficient a en fonction de l'étalement granulométrique des inclusions d_{\min}/d_{\max} . On trouve que la meilleure corrélation est de la forme exponentielle suivante :

$$b = 96e^{\frac{d_{\min}/d_{\max}}{1,29}} - 67 \quad (5.4)$$

avec

b : pente de la droite $\Delta q_{\max}/q_{\text{mat},\max}$;

d_{\min}/d_{\max} : étalement granulométrique des inclusions.

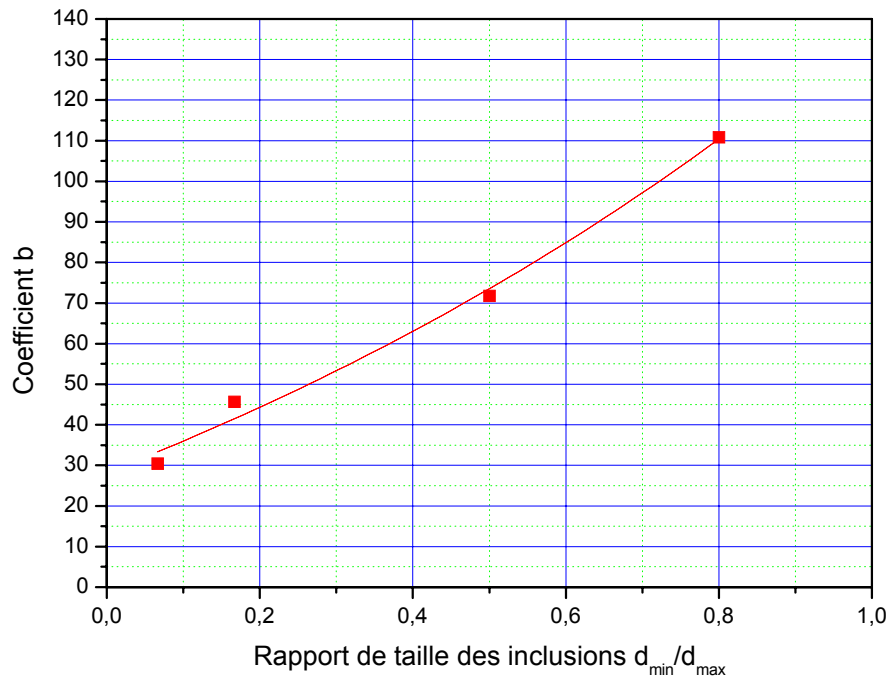


Figure V. 8 : Corrélation du coefficient b en fonction de d_{min}/d_{max}

V.3. Application et évaluation de la méthode proposée à un sol grossier naturel

Le sol choisi est une grave silico-calcaire. On va appliquer la méthode de caractérisation précédente à ce sol, puis on valide cette méthode en effectuant un essai triaxial (\varnothing 300 mm) sur le sol complet. Comme on a constaté précédemment que l'accroissement de résistance au cisaillement du sol grossier ne dépendait pas de l'état de densité de la matrice, on prendra comme hypothèse que celui-ci est même indépendant du type de matrice utilisée.

V.3.1 Application de la méthode proposée

La méthode proposée consiste à réaliser les 5 étapes suivantes

- a) *Prélèvement des échantillons de sol grossier hétérogène sur site*
- b) *Identification du matériau*

Le sol utilisé dans cette application est une grave silico-calcaire (Figure V. 9). Une analyse granulométrique a été réalisée sur le sol par tamisage, pour les particules de taille supérieure à 0,08mm et sédimentométrie, pour les particules de taille inférieure à 0,08 mm (Figure V. 10 et

Figure V. 11) (Normes Françaises NF P 94-056 et NF P 94-057). Le résultat est représenté sur la Figure V. 12. Les limites d'Atterberg sont : $w_l = 22 \%$, $w_p = 16 \%$ et $I_p = 6 \%$ (Figure V. 13) (Norme NF P 94-051). Le sol étudié est une grave limoneuse peu plastique, d'après le diagramme de plasticité (Figure V. 14) et la courbe granulométrique. Pour déterminer la masse volumique sèche, on a procédé à un essai Proctor (Norme NF P 94-093). D'après la Figure V. 15, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche correspondantes sont : $w_{OPM} = 8,0\%$; $\rho_{dOPM} = 2,07 \text{ g/cm}^3$.



Figure V. 9 : Vue du sol naturel étudié



Figure V. 10: Fraction des particules inférieures à 0,08 mm après séchage.



Figure V. 11: Essai de sédimentométrie sur la partie fine du matériau.

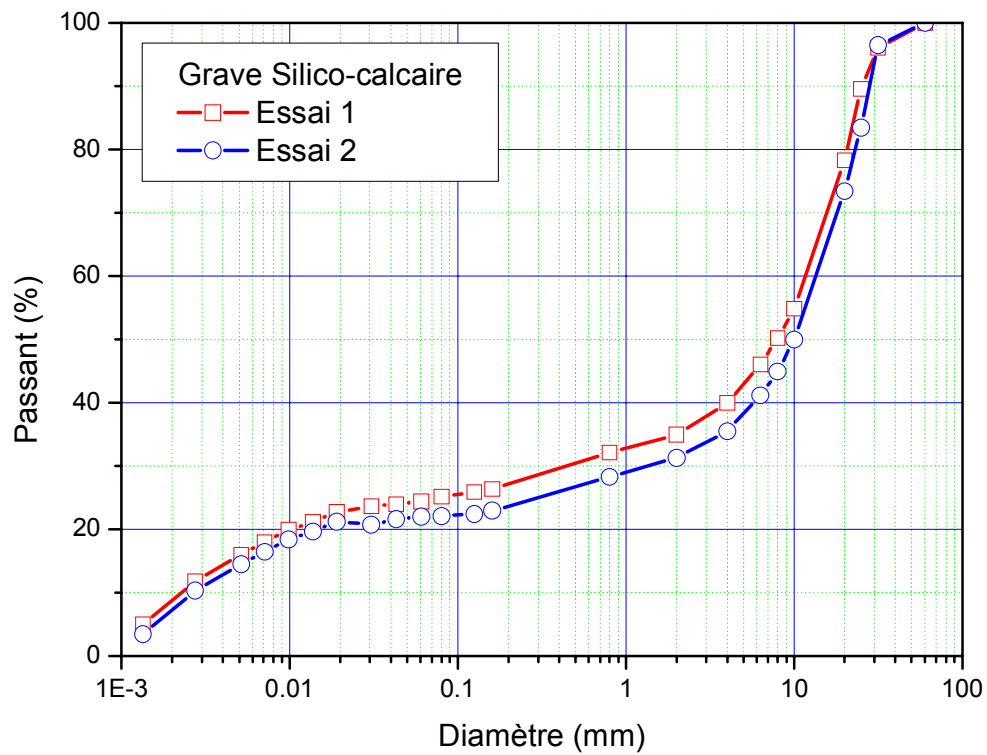


Figure V. 12: Courbes granulométriques de la grave silico-calcaire

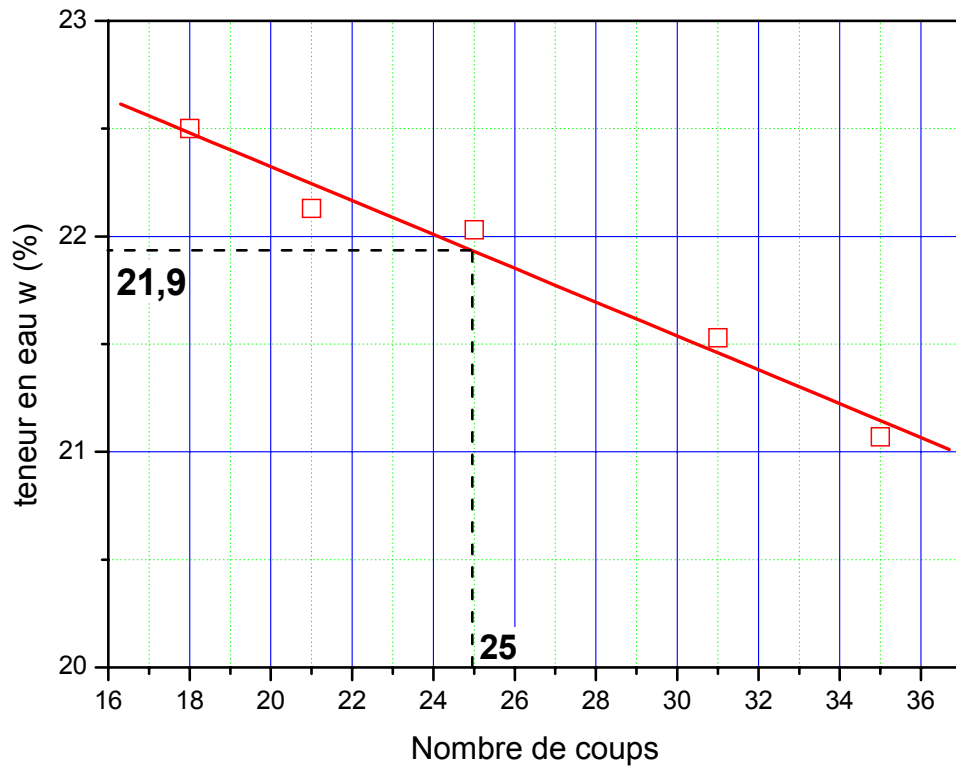


Figure V. 13: Détermination de la limite de liquidité

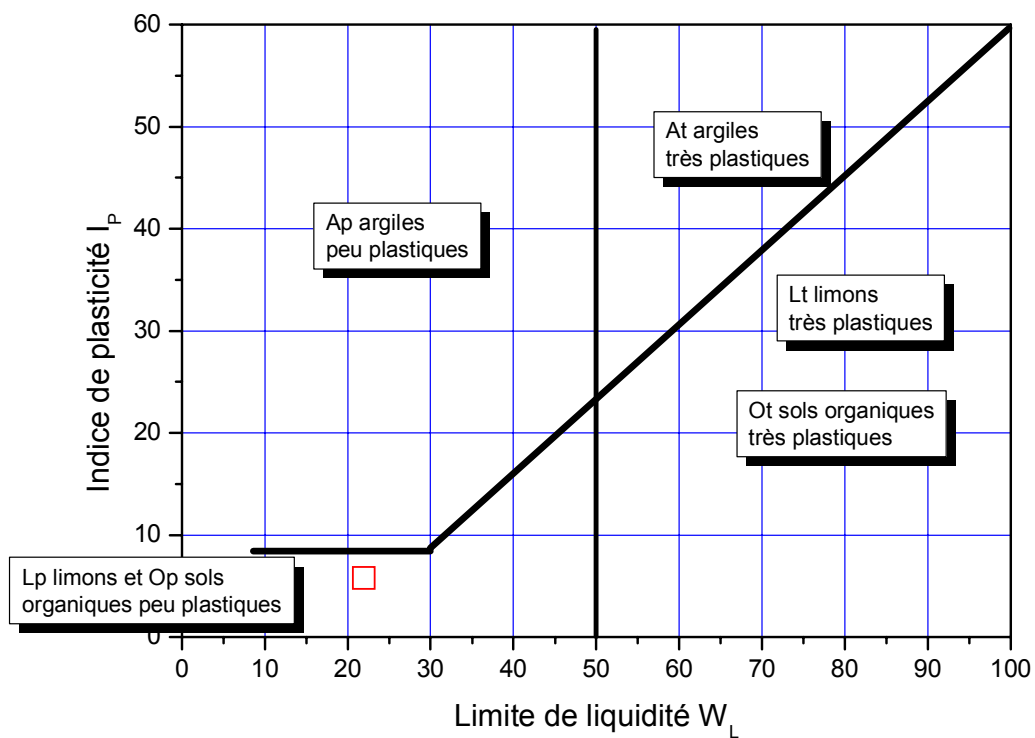


Figure V. 14: Diagramme de plasticité de Casagrande

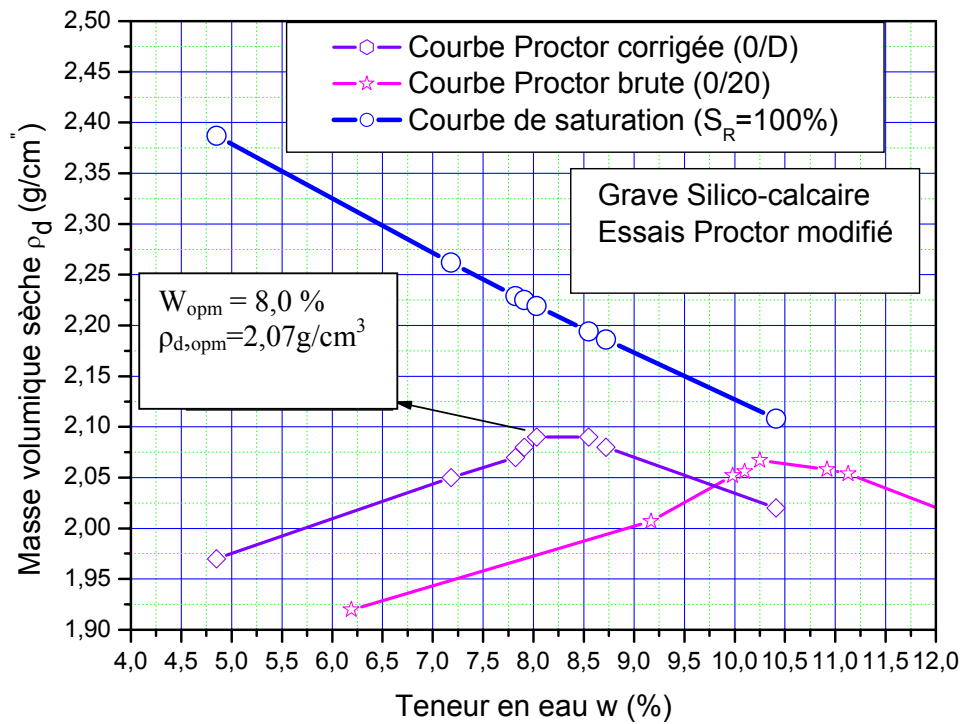


Figure V. 15: La courbe Proctor de la grave silico-calcaire

c) Identification de la partie matrice et de la partie inclusions

Pour pouvoir identifier à partir du sol naturel une partie matrice et une partie inclusions, c'est-à-dire un seuil d'écèlement, il faut respecter les critères suivants :

- la fraction volumique des inclusions à écèlement $f_v < 35 \%$;
- on doit également vérifier que le diamètre des plus grosses particules de la partie matrice est inférieur ou égal à $1/6$ du diamètre de l'éprouvette.

Nous avons décidé de réaliser trois niveaux d'écèlement. Un écèlement respecte les critères cités ci-dessus et deux ne les respectent pas :

- écrêtement du sol naturel à 20 mm

En effet, l'écrêtement du sol naturel à 20 mm provoque un enlèvement des particules entre 20 mm et 60 mm. Donc, les particules 0/20 mm sont considérées comme la matrice (sol écrêté), et les particules 20/60mm sont considérées comme des inclusions : la fraction volumique f_v des inclusions est égale à 19 % (< 35%) et le rapport de diamètre des plus grosses particules de la matrice (20 mm) sur le diamètre de l'éprouvette utilisé (100 mm) est égal à 1/5 (20 mm/100 mm)(au-dessus du critère). Donc, l'écrêtement à 20 mm ne respecte pas les critères.

- écrêtement du sol naturel à 16 mm

L'écrêtement du sol naturel à 16 mm conduit à un enlèvement des particules entre 16 mm et 60 mm. Les particules 0/16 mm sont considérées comme la matrice, et les particules 16/60 mm sont considérées comme des inclusions : la fraction volumique f_v des inclusions est égale à 25,40 % (< 35 %) et le rapport $d_{\text{max,mat}}/\varnothing_{\text{éproutette}} = 16/100 < 1/6$. Donc, l'écrêtement à 16 mm respecte les critères.

- écrêtement du sol naturel à 10 mm

L'écrêtement du sol naturel à 10 mm conduit à un enlèvement des particules entre 10 mm et 60 mm. Les particules 0/10 mm sont considérées comme la matrice, et les particules 10/60 mm sont considérées comme des inclusions: la fraction volumique f_v de ces particules est égale à 38 % (> 35 %) et le rapport $d_{\text{max,mat}}/\varnothing_{\text{éproutette}} = 10/100 = 1/10 < 1/6$. Donc, l'écrêtement à 20 mm ne respecte pas les critères.

d) Essais triaxiaux Ø 100mm sur la partie matrice

Trois séries d'essais ont été réalisées en fonction du niveau d'écrêtement :

- première série : sol écrêté à 20 mm ;
- deuxième série : sol écrêté à 16 mm ;
- troisième série : sol écrêté à 10 mm.

La masse volumique sèche ρ_d est maintenue constante pour tous les essais. La masse volumique sèche de la matrice est la même que celle dans le sol complet (à 95 % de l'optimum Proctor ; $\rho_d = 1,96 \text{ g/cm}^3$ et $w = 7,8 \%$). La contrainte de confinement appliquée pour tous les essais est de 100 kPa.

En vue de mettre en évidence l'effet de vitesse de cisaillement sur le comportement, on a effectué deux essais triaxiaux sur un sol écrêté à 20 mm, avec deux vitesses différentes (0,025%/min et 0,05%/min) (Figure V. 16). On constate que l'effet de vitesse est négligeable.

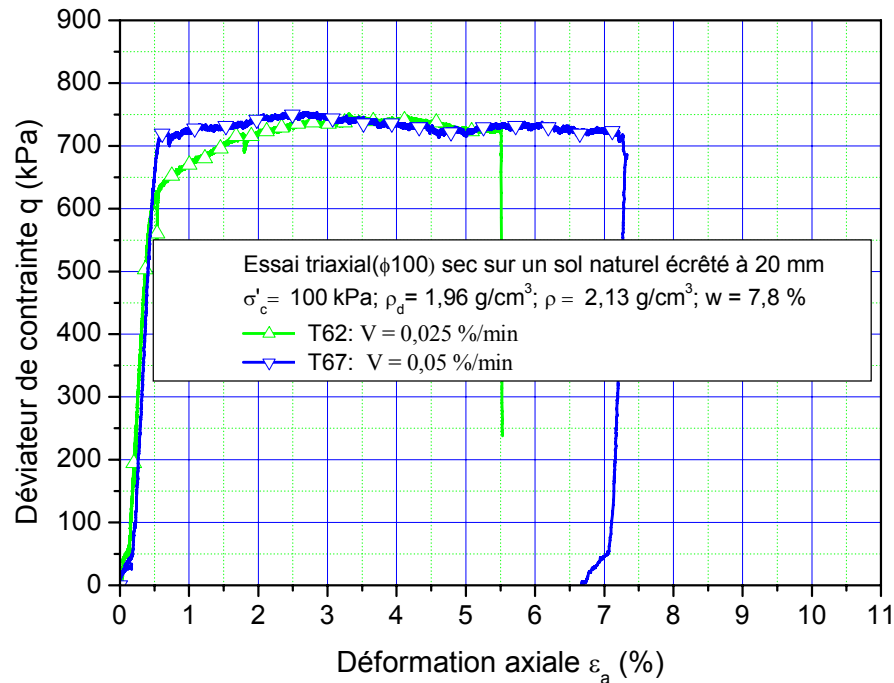


Figure V. 16 : Influence de la vitesse de cisaillement sur les comportements observés.

Donc la vitesse de déformation axiale est prise constante pour tous les essais (0,05%/min).

Détermination de l'état initial du matériau écrêté

Le choix de l'état initial du matériau écrêté (matrice) est très important. Pedro (2004) a comparé le comportement du sol complet (matrice + inclusions) à celui de la matrice dans les deux cas suivants :

- la matrice et le sol complet sont compactés à une masse volumique identique ;
- la matrice est compactée à la masse volumique dans laquelle elle se trouve lorsqu'elle est mélangée avec les inclusions (sol complet).

Pedro [2004] a trouvé que le deuxième cas est plus raisonnable. Donc, nous testons les éprouvettes de matrice (sol écrêté), à un état de densité identique à celui dans lequel la matrice se trouve lorsqu'elle est mélangée avec les inclusions (sol naturel).

Donc le calcul de $\rho_{d,mat}$ du sol écrêté est obtenu en écrivant que le volume total de l'éprouvette hétérogène V_{total} correspond à la somme du volume des inclusions V_{incl} et du volume de la matrice qui comprend les grains et les vides :

$$V_{total} = V_{mat} + V_{incl}$$

L'équation ci-dessus équivaut à

$$V_{total} = \frac{M_{mat}}{\rho_{mat}} + \frac{M_i}{\rho_{s,i}}$$

où M_{mat} et M_i représentent respectivement la masse de la matrice et celle des inclusions. La définition de la fraction massique des inclusions f_m implique :

$$M_i = f_m \times M_{total}$$

$$\text{et } M_{mat} = (1-f_m) \times M_{total}$$

donc le volume total de l'éprouvette s'écrit

$$V_{total} = M_{total} \left(\frac{1-f_m}{\rho_{mat}} + \frac{f_m}{\rho_{s,i}} \right)$$

alors la masse volumique théorique d'une éprouvette du sol complet s'écrit :

$$\rho_{total} = \frac{1}{\left(\frac{1-f_m}{\rho_{mat}} + \frac{f_m}{\rho_{s,i}} \right)} \quad (5.5)$$

donc la masse volumique de la matrice est égale à :

$$\rho_{mat} = \frac{1-f_m}{\left(\frac{1}{\rho_{total}} + \frac{f_m}{\rho_{s,i}} \right)} \quad (5.6)$$

A partir de la masse volumique du sol naturel (ρ), nous pouvons calculer la masse volumique de la matrice ρ_{mat} (sol écrêté) et par conséquent, la masse volumique sèche de la matrice $\rho_{d,mat}$.

Le Tableau V. 3 suivant présente les principales caractéristiques des essais réalisés. On note que la masse volumique sèche de la matrice varie en fonction du seuil d'écrêtement.

Essai	Sol	Dispositif	$\rho_{d,mat}$ (g/cm ³)	w (%)	σ'_c (kPa)	Vitesse (%/min)	q (kPa)
T62	Sol naturel écrêté à 20 mm	Ø100 mm	1,89	7,8	100 kPa	0,025	740
T67	Sol naturel écrêté à 20 mm	Ø100 mm	1,89	7,8	100 kPa	0,05	744
T64	Sol naturel écrêté à 10 mm	Ø100 mm	1,76	7,8	100 kPa	0,05	590
T68	Sol naturel écrêté à 10 mm	Ø100 mm	1,76	7,8	100 kPa	0,05	603
T69	Sol naturel écrêté à 16 mm	Ø100 mm	1,85	7,8	100 kPa	0,05	700

Tableau V. 3 : Caractéristiques principales des essais triaxiaux

Résultats obtenus

Pour vérifier la procédure expérimentale, nous avons réalisé deux essais de répétabilité sur un sol écrêté à 10 mm. La Figure V. 17 montre une différence dans les niveaux de déformation axiale entre 0,5 % et 3%, qui diminue dès que l'on atteint les niveaux de déformation importants (>3%). Ces différences viennent des difficultés de reconstitution de ces matériaux, en liaison au compactage associé. A partir de ces essais, on définit le fuseau de répétabilité. Ce fuseau permettra de conclure sur l'effet de l'écrêtement sur le comportement du sol grossier naturel.

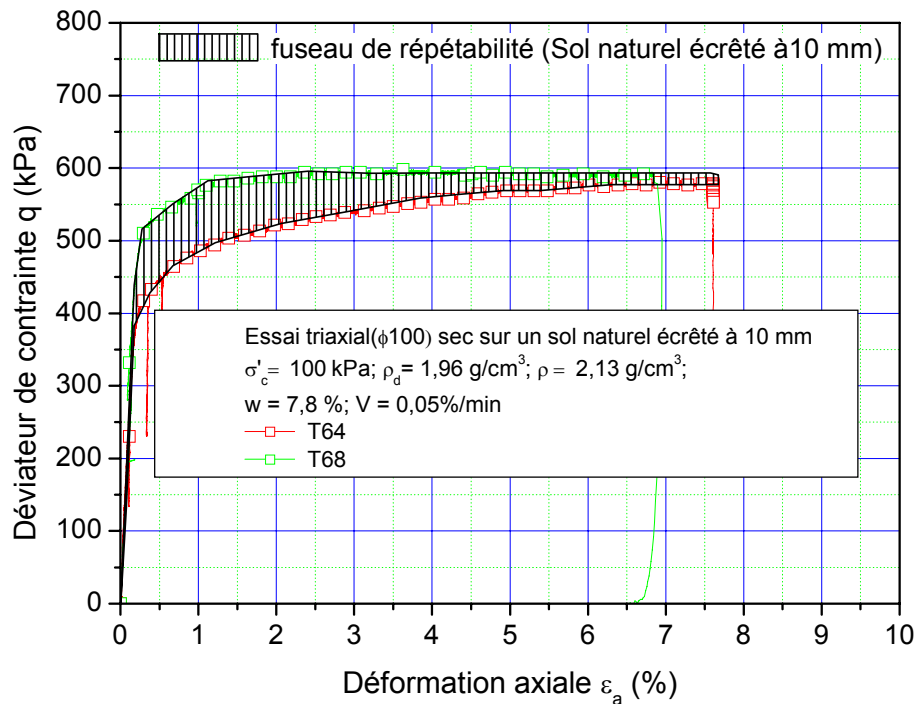


Figure V. 17 : Essais de répétabilité sur le sol naturel écrêté à 10 mm. Courbes de cisaillement.

La Figure V. 18 présente les résultats de trois séries d'essais cités ci-dessus. On constate que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du seuil d'écroûtement. On retrouve que l'écroûtement provoque une sous-estimation des caractéristiques mécanique du sol grossier naturel.

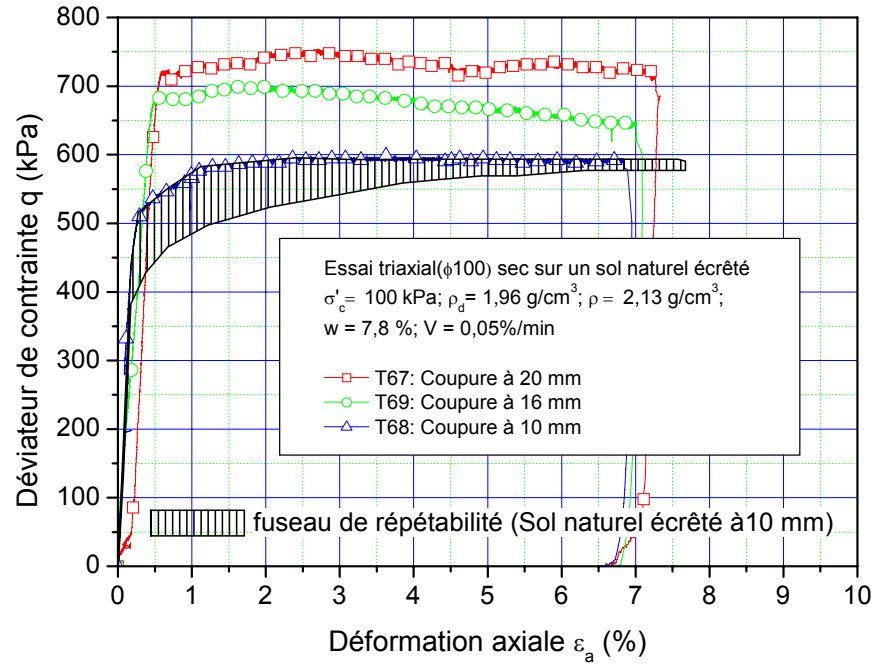


Figure V. 18 : Influence de l'écroûtement sur le comportement du sol grossier naturel écroûté. Courbes de cisaillement.

e) Calcul de l'accroissement de la résistance au cisaillement dû aux inclusions écroûtées et de la résistance au cisaillement théorique du sol complet

A partir des résultats expérimentaux obtenus ci-avant, l'accroissement de la résistance au cisaillement des inclusions écroûtées a été calculé à l'aide des deux formules (5.2 et 5.4) suivantes :

$$\Delta q_{\max}/q_{\text{mat,max}} = b.f_v \quad (5.2)$$

$$b = 96e^{\frac{d_{\min}/d_{\max}}{1,29}} - 67 \quad (5.4)$$

On déduit le déviateur du sol complet en ajoutant cet accroissement de déviateur sur la valeur expérimentale du déviateur du sol écroûté à la rupture (formule 5.3) :

$$q_{\text{sol compl,max}} = q_{\text{sol écroûté,max}} + \Delta q_{\max} \quad (5.3)$$

Le Tableau V. 4 présente les résultats théoriques obtenus par la méthode proposée :

Essai	Sol	Matrice	Inclusions (particules écrêtées)			b	$q_{mat,max}$ (kPa)	$\Delta q_{max} / q_{mat,max}$ (%)	$q_{sol\ compl,max}$ (kPa)
			d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	f_v (%)				
T62	Sol écrêté à 20 mm	Particules 0/20 mm	20	60	19	56	737	11	814
T67	Sol écrêté à 20 mm	Particules 0/20 mm	20	60	19	56	745	11	823
T64	Sol écrêté à 10 mm	Particules 0/10 mm	10	60	38	41	580	16	671
T68	Sol écrêté à 10 mm	Particules 0/10 mm	10	60	38	41	595	16	688
T69	Sol écrêté à 16 mm	Particules 0/16 mm	16	60	26	50	700	13	791

Tableau V. 4: Valeurs des résistances au cisaillement du sol complet obtenues à l'aide de la méthode proposée.

V.3.2 Caractérisation du sol grossier naturel (0/60 mm) à l'appareil triaxial (Ø 300 mm)

Pour évaluer les résultats obtenus par la méthode proposée, nous avons besoin de tester le sol grossier naturel. Alors, des essais ont été réalisés à l'aide de l'appareil triaxial de grandes dimensions (Ø 300 mm), sur le sol naturel. La contrainte de confinement et la vitesse de déplacement axiale sont gardées identiques à celles utilisées à l'appareil triaxial (Ø 100 mm). La contrainte de confinement initiale appliquée pour tous les essais est de 100 kPa. La vitesse de déformation axiale est 0,05 %/min. La masse volumique est maintenue constante à 95 % de l'optimum de Proctor ($\rho_d = 1,96 \text{ g/cm}^3$ et $w = 7,8 \%$).

Pour vérifier la procédure expérimentale, nous avons réalisé deux essais de répétabilité sur ce sol. La Figure V. 19 montre qu'on obtient une répétabilité moins satisfaisante que sur les sols de référence, mais cependant acceptable ($\Delta q_{\max}/q_{\text{moy},\max} = 6 \% < 10\%$). La différence entre les deux essais, est due à la méthode de compactage de ce matériau, qui ne permet pas d'avoir exactement la même compacité. A partir de ces essais, on détermine le fuseau de répétabilité du sol naturel. Ce fuseau permettra d'identifier l'effet de l'écrêtement du sol naturel et d'évaluer la méthode proposée.

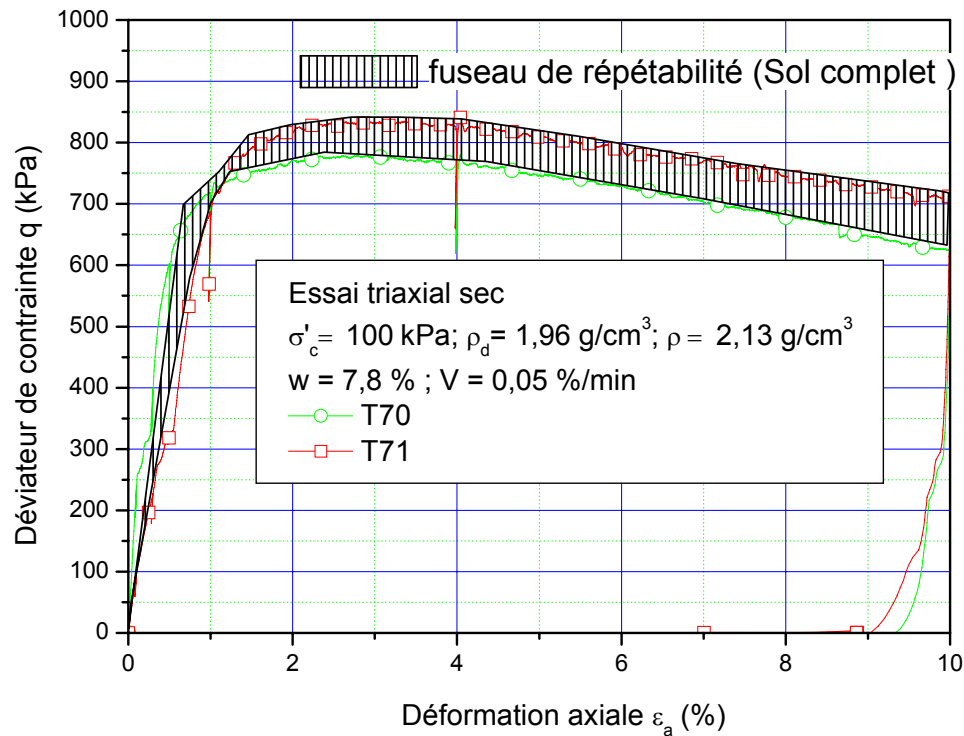


Figure V. 19 : Essais de répétabilité sur le sol naturel. Courbes de cisaillement.

V.3.3 Comparaison entre les résultats obtenus sur le sol complet et les résultats obtenus sur les sols écrêtés

Un point important à vérifier concerne la comparaison entre les résultats obtenus sur les sols grossiers naturels (0/60 mm) et les résultats obtenus sur les sols grossiers naturels écrêtés. La Figure V. 20 montre que l'écrêtement du sol naturel diminue sa résistance au cisaillement. En effet, le sol écrêté à 20 mm a une résistance moins importante que le sol naturel (en dessous du

fuseau de répétabilité). On peut faire la même observation pour le sol écrêté à 16 mm et à 10 mm.

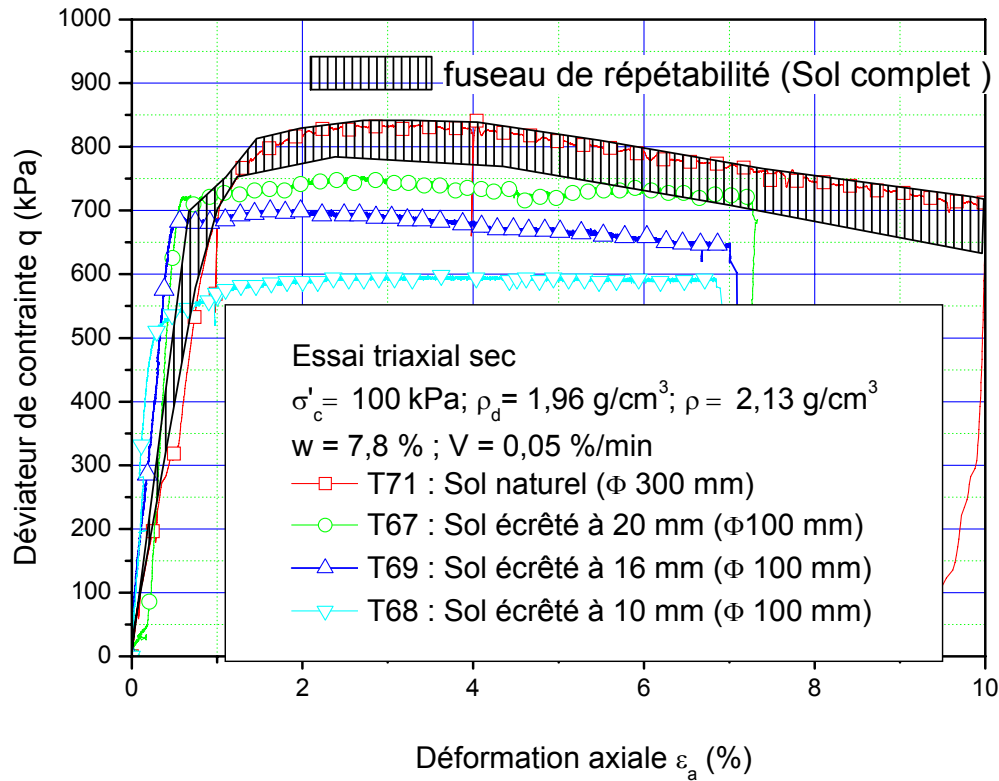


Figure V. 20 : Comparaison entre les résultats obtenus sur le sol grossier complet (0/60 mm) et sur les sols grossiers écrêtés. Courbes de cisaillement.

V.3.4 Évaluation de la méthode proposée

Pour évaluer la méthode proposée, nous avons comparé les résultats obtenus par la méthode avec le fuseau de répétabilité du sol complet. La Figure V. 21 présente, les valeurs du résistance au cisaillement pour les trois niveaux d'écrêtement (20 mm, 16 mm et 10 mm), ainsi que le fuseau de répétabilité du sol complet.

La Figure V. 21 montre que la méthode donne de bons résultats pour le sol écrêté à 20 mm, bien que, à ce seuil d'écrêtement, le critère $\emptyset_{\text{éprouvette}}/d_{\text{max}} (= 1/5 > 1/6)$ ne soit pas respecté. Les deux valeurs "théoriques" sont dans le fuseau prévu.

Ensuite, on trouve le même résultat pour le sol écrêté à 16 mm, là où les critères sont respectés.

Par contre, pour le sol écrêté à 10 mm, on trouve que les valeurs du déviateur de contrainte se trouvent en dessous du fuseau de répétabilité. A ce seuil d'écrêtement, la fraction volumique

des particules écrêtées f_v est plus supérieure à 35 % ($f_v = 38$ %) ; le critère n'est donc pas respecté.

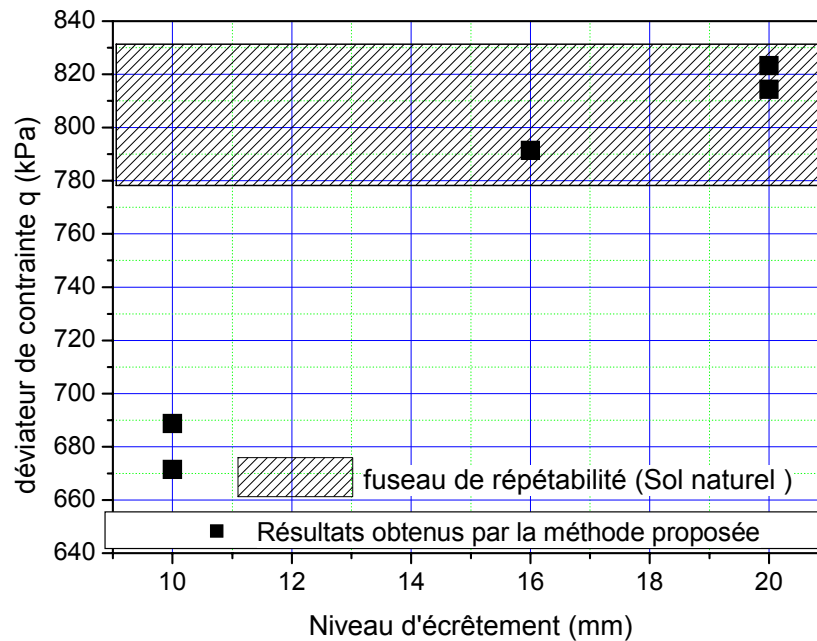


Figure V. 21: Valeurs de résistance au cisaillement "théorique" pour différents niveaux de coupure du sol complet.

V.4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons évalué les méthodes actuellement utilisées pour déterminer les caractéristiques mécaniques des sols grossiers en laboratoire : la méthode d'écrêtement et la méthode de substitution. En effet, à partir des résultats expérimentaux obtenus, concernant l'influence de la fraction volumique et de l'étalement granulométrique des inclusions, il semble que ces deux méthodes ne sont pas optimales pour caractériser les sols grossiers.

L'ensemble des résultats obtenus dans le chapitre III a permis de proposer une nouvelle méthode de caractérisation de sol grossier à partir du comportement de la matrice seule et d'une corrélation linéaire entre le gain de résistance résultant des inclusions et la fraction volumique f_v et l'étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} des inclusions. Une application et l'évaluation de cette nouvelle méthode ont été effectuées sur un sol naturel. Les résultats montrent que cette méthode donne d'assez bons résultats.

CONCLUSION GENERALE

On a présenté, dans ce mémoire, les travaux réalisés sur l'étude du comportement mécanique des sols grossiers à matrice, dont l'objectif a été de développer une méthodologie de caractérisation du comportement de ces sols. Nous avons donc étudié l'effet des paramètres fondamentaux sur le comportement de sols grossiers de référence à l'appareil triaxial et à la boîte de cisaillement direct.

A l'appareil triaxial, ces études ont permis de mettre en évidence l'influence de la présence des inclusions sur le comportement des sols grossiers de référence pour deux états de densité de la matrice, moyennement dense et lâche.

Dans le cas d'une matrice moyennement dense, nous avons conclu que la fraction volumique des inclusions joue un rôle important. En particulier, leur présence entraîne un accroissement significatif de la résistance au cisaillement du sol. Concernant l'effet de la taille des inclusions nous avons trouvé que ce paramètre n'a pas d'influence significative sur l'accroissement de la résistance au cisaillement du sol. Par ailleurs, nous avons remarqué que l'étalement granulométrique a un effet significatif sur l'accroissement de la résistance au cisaillement, de manière que cet accroissement diminue pour un sol étalé.

Dans le cas d'une matrice lâche, on obtient les mêmes évolutions que pour la matrice dense, en ce qui concerne l'influence de la fraction volumique f_v , la taille d_{\max} et l'étalement granulométrique d_{\min}/d_{\max} des inclusions.

L'étude des deux états de densité de la matrice a permis de montrer que l'accroissement de la résistance au cisaillement du sol est très peu sensible à cet état de densité. Nous avons trouvé également que cet accroissement est indépendant de l'état initial de consolidation.

Ces observations ont été à la base de la méthode proposée dans la suite pour évaluer les caractéristiques de rupture de ce type de sol.

La caractérisation des mêmes sols de référence, à l'état moyennement dense, a été réalisée également à la boîte de cisaillement direct. Son objectif a été de mettre en évidence l'effet de ces paramètres sur le sol grossier à l'aide d'un autre dispositif et de comparer les deux dispositifs (triaxial et boîte de cisaillement direct) pour évaluer l'un par rapport à l'autre. Les résultats obtenus sur ces sols de référence à l'aide de la boîte de cisaillement montrent, comme

pour l'essai triaxial, l'effet de renforcement apporté par les inclusions sur la résistance au cisaillement de ces sols. Par contre, la taille et l'étalement granulométrique des inclusions n'ont pas d'effet significatif sur le comportement à la rupture du sol grossier.

En ce qui concerne l'étude comparative, nous avons trouvé que la boîte de cisaillement donne des valeurs plus grandes que celles obtenues à l'appareil triaxial. Nous avons choisi l'appareil triaxial comme essai de comportement de référence.

Les études paramétriques ont permis de mettre en évidence le rôle des inclusions sur les résultats expérimentaux obtenus sur les sols de référence. Nous avons cherché à déterminer une méthodologie pour la caractérisation de sols grossiers à matrice à partir de l'appareil triaxial. Dans un premier temps, nous avons évalué les méthodes utilisées actuellement (écrêtement et substitution) et nous avons constaté que ces méthodes ne donnent pas des résultats suffisamment fiables. Pour cela, et à partir des résultats expérimentaux obtenus dans la troisième partie, nous avons proposé une méthodologie qui permet de caractériser le sol grossier à la rupture à l'aide de l'appareil triaxial de taille courante. Cette méthode consiste à écrêter les gros éléments et à tester le sol écrêté à l'appareil triaxial de taille classique et ensuite, à ajouter l'accroissement de la résistance au cisaillement des inclusions écrêtées. Pour pouvoir déterminer le seuil d'écrêtement il faut respecter deux critères : le premier est de respecter une fraction volumique des inclusions écrêtées inférieure à 35 % et le deuxième est de vérifier que le diamètre des plus gros éléments de la partie matrice (sol écrêté) soit inférieur à 1/6 du diamètre de l'éprouvette. Enfin, nous avons appliqué cette méthodologie à un sol grossier naturel (0/60 mm) et nous avons pu valider cette méthode.

En ce qui concerne les perspectives à ce travail, il serait intéressant de compléter l'étude expérimentale avec des essais sur le sol grossier comportant une matrice dans un état lâche. Il sera également intéressant de s'intéresser au comportement en petites déformations pour lequel on pourra développer une méthode d'analyse analogue à celle présentée ici pour les caractéristiques de rupture, en vue d'évaluer les paramètres d'élasticité du matériau et en particulier leur dépendance par rapport aux inclusions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Afnor (1996) NF P 94-048. Détermination de la teneur en carbonate. 11 p.
- [2] Afnor (1993) NF P 94-051. Détermination des limites d'Atterberg. 15 p.
- [3] Afnor (1991) NF P 94-054. Détermination de la masse volumique des particules solides de sol – Méthode au pycnomètre. 6 p.
- [4] Afnor (1996) NF P 94-056. Analyse granulométrique d'un sol - Méthode par tamisage à sec après lavage. 15 p.
- [5] Afnor (1992) NF P 94-057. Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation. 17 p.
- [6] Afnor (1998) NF P 94-068. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache. 8 p.
- [7] Afnor (1994) NF P 94-071-1. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte. Partie 1 : cisaillement direct. 16 p.
- [8] Afnor (1997) NF P 94-093. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié. 18 p.
- [9] Afnor (1997) XP P 18-540. Granulats, définitions, conformité, spécification. 41 p.
- [10] Afriani L. (2003). Essais de cisaillement direct des sols grossiers : Incidences des procédures d'essai et effets d'échelle. Thèse de doctorat, Université de Caen. 184 p.
- [11] Anagnosti P. (1982). Les propriétés de déformation et de résistance des matériaux à gros grains. *Revue Française de Géotechnique*, 18, pp. 5-19.
- [12] Bakir, N. (1993). Etude sur modèles centrifugés de la capacité portante de fondations superficielles. Thèse de doctorat, ECN, Université de Nantes, 207 p.
- [13] Benahmed N. (2001). Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique: application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne la Vallée. 351 p.
- [14] Bolton M. D. & Lee D. M. (1993). Back analysis of a pilot scale shear test on coarse granular fill. In *Engineered fills*, Thomas Thelford, London, pp. 214-225.
- [15] Bourdeau Y. (1997). Le comportement des alluvions du Rhône dans une grande boîte de cisaillement direct. *Revue Française de Géotechnique*, 79, pp. 45-57.
- [16] Bourdeau Y., Laréal P. & Marchal J. (1989). Résistance au cisaillement des alluvions du Rhône. In *Proceeding of twelfth ICSMFE*, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 695-696.

- [17] Cruz P. T. & Nieble C.N. (1971). Engineering properties of residual soils and granular materials originated from Basalt – Capivari Dam-Bresil. Proceeding of the Fifth Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luanda, Vol. 1, pp. 143-149.
- [18] Combarieu O. (1995). L'essai pressiométrique et la résistance au cisaillement des sols. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 196, pp. 43-51.
- [19] Dano C. (2001). Comportement mécanique des sols injectés. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 214 p.
- [20] Donagh R. T. & Torrey V. H. (1979). Scalping and replacement effects on strength parameters of earth-rock mixtures. In BGS, editor, Design Parameters in geotechnical engineering, London, Vol. 2, pp. 29-34.
- [21] Dendani H. (1988) Comportement de matériaux de barrages en terre : étude expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 291 p.
- [22] Dubreucq, T (1999). Renforcement des fondations superficielles par inclusions planes horizontales extensibles. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 352 p.
- [23] Feng G. & Vitton S. J. (1997). Laboratory determination of compaction criteria for rock fill material embankment. In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Hambourg, Vol. 1, pp. 485-488.
- [24] Fry J. Mamba M. & Flavigny E. (1989). Classification et propriétés des enrochements: Le cas d'un grès, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 713-714.
- [25] Fukuoka M. (1957). Testing of gravely soils with large-scale apparatus. In Compte Rendus du Quatrième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Londres, Vol. 1, pp. 153-155.
- [26] Fumugalli, E. (1969). Tests on cohesionless materials for rockfill dams. Journal of the soil mechanics and foundations division. ASCE. 95, n°SM1, pp. 313-330.
- [27] Gotteland P., Tacnet J. M. & Aboura A. (2000). Caractérisation des sols grossiers, application aux sols de torrents. Revue française de génie civil, 4, pp. 325-338
- [28] Holtz W. G. & Gibbs H. J. (1956). Triaxial shear test on previous gravely soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundation of the ASCE, Vol. 82 (SM1), pp 1-9.
- [29] Holtz W. G. & Willard E. (1961). Triaxial shear characteristics of clayed gravel soils. Comptes rendus, 5^{ème} Congrès International de Mécanique des Sols et Travaux de Fondation, Paris, pp. 143-149.

- [30] Jain S. P. & Gupta R. C. (1974). *In situ* shear test for rock fills. Journal of geotechnical engineering division, Vol. 100, GT9, pp. 1031-1050.
- [31] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1987). Essai de cisaillement à la boîte. Méthode d'essai LCPC, 21, 27 p.
- [32] Leslie D. D. (1963). Large-scale triaxial tests on gravely soils. In Proceeding of the second panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 181-202.
- [33] Lowe J. (1964). Shear strength of coarse embankment dam materials. In 8th International Congress on Large Dams, Edimbourg, Great Britain, Vol. 3, pp. 745-761.
- [34] Luong P. M. (1978). Etat caractéristique du sol, C.Rc.Sc, Paris t.287, série B, 313 p.
- [35] Luong P. M. (1980). Phénomènes cycliques dans les sols pulvérulents. Revue française de géotechnique, Vol. 10, pp. 39-53.
- [36] Magnan J. P. (1998). Cours de Mécanique des sols et des roches. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 152p.
- [37] Marchi N. D., Chan C. K. & Seed H. B. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 98 (SM1), pp. 95-114.
- [38] Ménard, L. (1961). Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contrainte sur le tassement d'un sol de fondation, 5^{ème} congrès International de Mécanique de Sols et de Travaux de Fondation, Paris, Vol. 2, pp. 112- 113.
- [39] Nichiporovitch A. A. & Rasskazov L. N. (1967). Shear strength of coarse fragmental materials. Proceeding of the Geotechnical Conference, Oslo, Vol. 1, pp. 225-229.
- [40] Pedro L. (2004). Etude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 294 p.
- [41] Perrot, A. (1968). Etude de la résistance au cisaillement des matériaux grossiers. Rapport interne du laboratoire des Ponts et Chaussées, 40 p.
- [42] Philipponnat G. (1986). Le phicomètre, analyse de 200 essais de cisaillement *in situ*. Annales ITBTP, 460, pp. 66-87.
- [43] Philipponnat G. et Zerhouni, M. (1993). Interprétation de l'essai au phicomètre. Revue Française de Géotechnique, 65, pp. 3-28.

- [44] Post G. (1979). Design parameters for fills. In Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Brighton, London, Vol. 4.
- [45] Santos A., Martinez J.M., Garcia de la Oliva J.L. (1993). Efecto en los Ensayos de Laboratorio de Propiedades Resistentes de Materiales Granulares. Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Sueltos. Zaragoza, pp. 117-122.
- [46] Shirdam R. (1998). Comportement mécanique des matériaux superficiels des versants naturels. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 216 p.
- [47] Shirdam R., Faure R. M. S. et Magnan J. P. (1998). Caractérisation des éboulis de pente à l'aide d'une grande boîte de cisaillement. The Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks, Balkema, Rotterdam, pp. 869-880.
- [48] Siddiqi F. H. (1984). Strength Evaluation of Cohesion less Soil with Oversize Particles. Thèse de doctorat, University of California, 180 p.
- [49] Terzaghi, K., Peck, R.B. (1965). Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et bâtiment. Dunod éditeur, Paris, 565 p.
- [50] Thiers G. R. & Donovan T. D. (1981). Field density, gradation, and triaxial testing of large-size rockfill for Little Blue Run dam. In R.N. Young & F.C. Townsend, editors, Laboratory Shear Strength of Soil, American Society for Testing and Material (ASTM) STP 740, pp. 315-325.
- [51] Torrey, V.H. & Donagh, R.T. (1985). Strength parameters of earth-rock mixtures. Proceedings of the eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, Vol. 2, pp. 1073-1076
- [52] Valle N. (1998). Mesure de la résistance du cisaillement des sols grossiers à la boîte de cisaillement. Mémoire de DEA, Ecole Centrale de Paris, 98p.
- [53] Valle N. (2001). Propriétés mécaniques d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Caen, 304 p.
- [54] Wiseman G., Birnbaum A., Goldwasser Y., Hayati G. (1987). Large shear box tests on wadi gravel. In the eighth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto, Japan, Vol. 1, 2, Page 125-128.
- [55] Yagiz S. (2001). Brief note on the influence of shape and percentage of gravel on the shear strength of sand and gravel mixtures. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 60, 4, pp. 321-323.
- [56] Zhang Q.Y. & Si H.Y. (1982). Shear strength and stress strain properties of coarse-grain soil. Proceedings of the Seventh South East Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, Vol. 1, pp. 931-945.

LISTE DES SYMBOLES

- c, c' : cohésion effective apparente du sol (kPa).
- C_U : coefficient d'uniformité.
- d_{\max} : diamètre maximal des grains (mm).
- $d_{50, \text{mat}}$: diamètre moyen de la matrice (mm).
- $d_{50, \text{incl}}$: diamètre moyen des inclusions (mm).
- d_{10} : diamètre correspondant à 10 % de passants (mm).
- d_{30} : diamètre correspondant à 30 % de passants (mm).
- d_{50} : diamètre correspondant à 50 % de passants (mm).
- d_{60} : diamètre correspondant à 60 % de passants (mm).
- $D, D_0, \Phi_{\text{épreuve}}$: diamètre de l'éprouvette à l'essai triaxial (mm).
- d^r : dimension des grains du matériau réel.
- d^m : dimension des grains du matériau modèle.
- d : diamètre nominal d'un grain.
- e : indice des vides d'un sol.
- e_{\min} : indice des vides minimal.
- e_{\max} : indice des vides maximal.
- E : module d'Young (MPa).
- $E_{\text{mat}}, E^{\text{mat}}$: module d'Young de la matrice (MPa).
- f_v : fraction volumique des inclusions (%).
- f_m : fraction massique des inclusions (%).
- $I_D, I_{D, \text{mat}}$: indice de densité de la matrice.
- I_P : indice de plasticité (%).
- h : hauteur totale de la boîte de cisaillement, hauteur de l'éprouvette à l'essai triaxial (mm).

K : module de compression isotrope (MPa)

L, L_0 : longueur ou côté de la boîte de cisaillement (mm).

M_c : valeur du rapport q/p' à la rupture.

M_p : valeur du rapport q/p' à l'état caractéristique.

M_{incl} : masse des inclusions (kg).

M_{mat} : masse de la matrice (kg).

M_{total} : masse totale de l'éprouvette (kg).

N : effort normal (kN).

p'_c, σ'_c : contrainte de consolidation du sol (kPa).

q : déviateur de cisaillement (kPa).

q_{max} : déviateur de cisaillement à la rupture (kPa).

q_{car} : déviateur de cisaillement à l'état caractéristique du sol (kPa).

$q_{rupture}$: déviateur de cisaillement à la rupture (kPa).

$q_{max,mat}$: déviateur de cisaillement de la matrice à la rupture (kPa).

$p_{rupture}$: contrainte moyenne à la rupture (kPa)

S : surface (m^2).

t : espacement entre les deux demi boîtes (mm).

T : force de cisaillement horizontale ou effort de traction dans l'essai phicométrique (kN).

T_c : taux de compactage (%).

v : vitesse de déplacement relatif de deux demi boîte (mm/s).

VBS : valeur de bleu de méthylène d'un sol.

V_{total} : volume total de l'éprouvette d'un sol (m^3).

V_{incl} : volumique des inclusions (m^3).

V_{mat} : volume de la matrice (m^3).

V_{grains} : volume des grains de la matrice (m^3).

V_v : volume des vides dans l'éprouvette (m^3).

w : teneur en eau (%).

w_l : limite de liquidité (%).

W_p : limite de plasticité (%).

W_{OPN} : teneur en eau à l'optimum Proctor Normal (%).

W_{OPM} : teneur en eau à l'optimum Proctor Modifié (%).

$\delta_h, \Delta l$: déplacement horizontale à la boîte de cisaillement (mm)

Δl : déplacement horizontal (mm).

$\Delta q_{\text{max}}/q_{\text{max,mat}}$: accroissement de la résistance au cisaillement (%).

$\Delta K/K_{\text{mat}}$: accroissement du module de compression isotrope à la rupture (%).

$\Delta E/E_{\text{mat}}$: accroissement du module d'Young à la rupture (%).

$\Delta V/V_{\text{moy}}$: incertitude sur la variation de volume à la rupture (%).

$\Delta q/q_{\text{moy}}$: incertitude sur le déviateur à la rupture (%).

ε_v : déformation volumique du sol (%).

ε_a : déformation axiale du sol (%).

ϕ, ϕ' : angle de frottement interne et angle de frottement interne effectif d'un sol (°).

ϕ'_{car} : angle caractéristique du sol (°).

ϕ_{pic} : angle de frottement interne du sol au pic (°).

ϕ_{palier} : angle de frottement interne du sol au palier (°)

ρ_d et γ_d : masse volumique sèche du sol (g/cm^3).

ρ_{dm} : masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée (g/cm^3).

ρ_s : masse volumique des particules solides (g/cm^3).

ρ_{mat} : masse volumique de la matrice (g/cm^3).

$\rho_{s,\text{incl}}$: masse volumique des particules solides des inclusions (g/cm^3).

$\rho_{s,\text{mat}}$: masse volumique des particules solides de la matrice (g/cm^3).

$\rho_{d,\text{mat}}$: masse volumique sèche de la matrice (g/cm^3).

$\rho_{d,\text{max}}, \rho_{d,\text{min}}$: masse volumique sèche maximale et minimale (g/cm^3).

ρ_{dOPM} : masse volumique optimum Proctor modifié (g/cm^3).

ρ_{incl} : masse volumique de l'inclusions (g/cm^3).

σ et σ_N : contrainte normale moyenne appliquée à l'éprouvette (kPa).

σ_3 : pression latérale (kPa).

σ' : contrainte effective (kPa).

τ : contrainte de cisaillement (kPa).
